

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2014

Bc. Milan Buček

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Návrh Rogowského cívky pro měření impulzu proudu
Design Rogowski coil for measuring pulse current

2014

Bc. Milan Buček

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Milan Buček**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Návrh Rogowského cívky pro měření impulzu proudu.**
Design Rogowski Coil for Measuring pulse Current

Zásady pro vypracování:

1. Charakterizujte měření impulzu proudu Rogowského cívkou s pasívním zakončením.
2. Pro jmenovitý atmosférický proudový impulz navrhnete obvodové prvky měření.
3. Proveďte návrh Rogowského cívky pro určené parametry.

Seznam doporučené odborné literatury:


PATOČKA, Miroslav. Magnetické jevy a obvody ve výkonové, měřicí a silnoproudé elektrotechnice. Brno : VUTIUM, 2011. 564 s. ISBN 978-80-214-4003-6

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Věslav Mach**


Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014



prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry





prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Poděkování

Poděkování patří především vedoucímu diplomové práce doc. Dr. Ing. Velešlavu Machovi, který mi díky svým jedinečným pedagogickým schopnostem dovedl vždy vysvětlit veškerou problematiku týkající se tvorby mé diplomové práce.

Datum: 2. 5. 2014

Podpis:



Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem Rogowského cívky s pasivním zakončením a návrhem obvodových prvků k měření impulzních atmosférických výbojových proudů tvaru vlny 8/20 μ s.

V práci je teoreticky rozebrán princip Rogowského cívky, charakteristika impulzní vlny ve frekvenční oblasti, dále problematika měření výbojových proudů se zakončením Rogowského cívky do kondenzátoru nebo odporu. Je navržen *RLC* generátor a obvodové prvky k měření výbojových impulzních proudů. Podle určených parametrů je realizován návrh dvou Rogowského cívek a jejich geometrických provedení se zakončením do kondenzátoru a odporu. Pro analýzu chování Rogowského cívky se zakončením do kondenzátoru a odporu pro periodický signál je použit program Pspice.

V dalším kroku je provedena simulace snímačů v programu ATP na výbojový atmosférický impulzní proud 8/20 μ s. Na základě výsledků obou simulací je zhodnocena vhodnost návrhů snímačů pro měření impulzních výbojových proudů.

Klíčová slova

Měření výbojových proudů, proudový impulz, Rogowského cívka

Abstrakt

This thesis describes the design of Rogowski coil with passive end and layout of circuit elements to measure atmospheric impulse discharge current waveform $8/20\ \mu\text{s}$. The work analyzes theoretically the Rogowski coil principle, characteristics of pulse waves in the frequency range, further the issue of measuring discharge currents with end Rogowski coil to a capacitor or resistor. *RLC* generator and circuit elements are designed to measure the discharge pulse currents. According to specific parameters a design of two Rogowski coils is implemented with their geometric design including end in a capacitor and resistor. Pspice program is used to analyze the behavior of the Rogowski coil to the end in the capacitor and resistor for the periodic signal. The next step is a simulation of sensors in program ATP to the discharge lightning impulse current $8/20\ \mu\text{s}$. Based on the results of both simulations is evaluated adequacy of the design of sensors for measuring pulse discharge currents.

Key words

Measuring the discharge currents, current pulse, Rogowski coil

Seznam použitých symbolů a zkratek

α	(s ⁻¹)	konstanta
β	(s ⁻¹)	konstanta
ε_0	(F·m ⁻¹)	permitivita vakua
ε_r	(F·m ⁻¹)	permitivita impregnační látky
μ_0	(H·m ⁻¹)	permeabilita vakua
ρ_{cu}	(Ω·m ⁻¹)	měrná rezistivita mědi
τ	(s)	časová konstanta
φ	(°)	fázová kmitočtová charakteristika
Φ	(Wb)	magnetický tok
ω	(s ⁻¹)	úhlová frekvence
a	(mm)	vnější rozměr cívky
B	(T)	magnetická indukce cívky
B_s	(Hz)	šířka pásma přenosu
b	(mm)	vnitřní rozměr cívky
b_t	(μm)	tloušťka izolace vodiče
C_c	(F)	kapacita kondenzátoru RC členu
C_g	(F)	kapacita generátoru
C_v	(F)	celková kapacita zapojení
D	(mm)	střední průměr cívky
d_1	(mm)	vnitřní průměr vodiče
d_2	(mm)	vnější průměr vodiče
d	(-)	označení průběhu proudového impulsu
d_{cu}	(mm)	průměr vodiče
d_p	(mm)	průměr jádra prstence cívky
f	(Hz)	frekvence
f_d	(Hz)	dolní mezní frekvence
f_h	(Hz)	horní mezní frekvence
f_r	(Hz)	rezonanční frekvence
H	(A·m ⁻¹)	intenzita magnetického pole
I_m	(A)	maximální výbojový elektrický proud
i_1	(A)	primární elektrický proud
i_2	(A)	sekundární elektrický proud

K_a	(dB)	modulová kmitočtová charakteristika
K_p	(V·A ⁻¹)	převodní konstanta
K_r	(F)	mezizávitová kapacita vinutí
K_{rv}	(F)	mezivrstvá kapacita vinutí
k_i	(-)	činitel izolace
k_t	(-)	činitel tvaru vodiče
L_g	(H)	indukčnost generátoru
L_p	(H)	parazitní indukčnost
L_r	(H)	indukčnost Rogowského cívky
l	(m)	délka Rogowského cívky
l_{cu}	(m)	délka vodiče
M	(H)	vzájemná indukčnost
N	(-)	počet závitů
O^*	(rad)	úhel pro odvození mezizávitové kapacity
q	(-)	činitel plnění vinutí cívky
R_b	(Ω)	odpor bočníku
$R_{\check{c}}$	(Ω)	odpor RC integračního členu
R_g	(Ω)	odpor RLC generátoru
R_r	(Ω)	odpor vinutí Rogowského cívky
R_v	(Ω)	celkový odpor zapojení
S	(mm ²)	průřez jádra cívky
T_1	(s)	doba čela proudového impulzu
T_2	(s)	doba půltýlu proudového impulzu
t	(s)	čas
U_0	(V)	nabíjené napětí
u_i	(V)	indukované napětí
u_2	(V)	výstupní napětí z integračního článku

Obsah

1.	Úvod.....	1
2.	Charakteristika měření impulzu proudu Rogowského cívky	2
2.1	Princip Rogowského cívky	2
2.2	Vinutí a geometrické parametry Rogowského cívky	5
2.3	Charakteristika proudového impulzu	10
2.4	Modelové schéma Rogowského cívky	15
2.5	Charakteristika Rogowského cívky se zakončením do odporu.....	16
2.6	Charakteristika Rogowského cívky se zakončením do kondenzátoru.....	19
2.7	Shrnutí vlastností měření Rogowského cívky s pasivním zakončením	22
3.	Obvodové prvky měření atmosférického proudového impulzu	23
3.1	Návrh obvodových prvků generátoru impulzního proudu	23
3.2	Návrh obvodových prvků pro zakončení do kondenzátoru	26
3.3	Návrh obvodových prvků pro zakončení do odporu	26
4.	Návrh Rogowského cívky	27
4.1	Návrh Rogowského cívky se zakončením do kondenzátoru	28
4.2	Simulace Rogowského cívky se zakončením do kondenzátoru	32
4.2.1	Simulace periodickým signálem	32
4.2.2	Simulace atmosférickým impulzním proudem	34
4.2.3	Souhrn vlastností Rogowského cívky se zakončením do kondenzátoru	38
4.3	Návrh Rogowského cívky se zakončením do odporu	39
4.4	Simulace Rogowského cívky se zakončením do odporu.....	43
4.4.1	Simulace periodickým signálem	43
4.4.2	Simulace atmosférickým impulzním proudem	46
4.4.3	Souhrn vlastností Rogowského cívky se zakončením do odporu	50
4.5	Zhodnocení návrhů	51
5.	Závěr.....	52
6.	Literatura	53

1. Úvod

V elektroenergetických soustavách se provádí měření stejnosměrného, střídavého a impulzního proudu na všech hladinách napětí, tj. nn, vn a vvn. Pro měření elektrického proudu se dnes již téměř vždy využívá nepřímých metod, tedy měření transformovaného obrazu měřeného proudu. Rogowského cívka se stále více uplatňuje díky konstrukční jednoduchosti a linearitě. V elektroenergetice nachází Rogowského cívka s pasivním zakončením uplatnění v řadě aplikací, nejvíce v případech, kdy je potřeba měřit proudy o vyšších frekvencích nebo rychlé přechodné děje, mezi které se řadí i výbojové impulzní proudy.

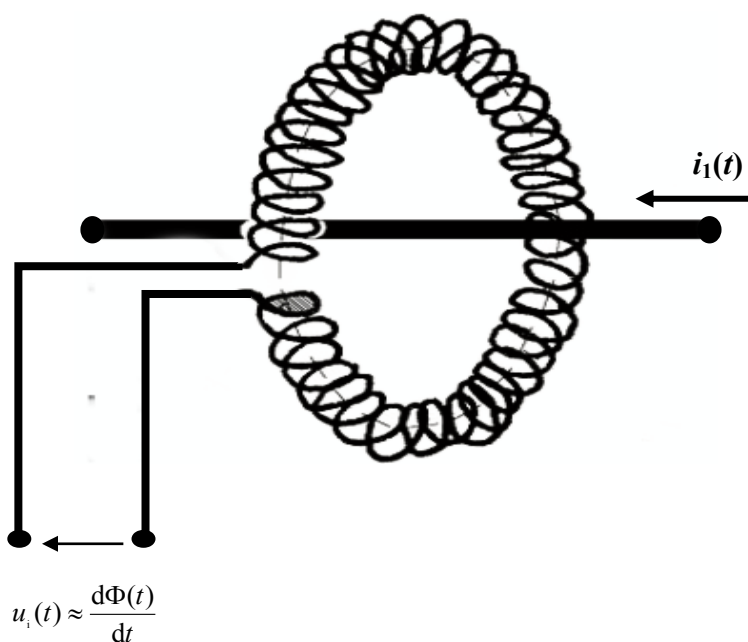
Snímače musí mít dostatečně velkou kmitočtovou šířku přenášeného pásma a citlivost pro přesné měření výbojových impulzních proudů. Toho se docílí vhodným návrhem vinutí a geometrických rozměrů Rogowského cívky. Výstup z Rogowského cívky se musí integrovat. Lze jej realizovat buď zakončením do odporu, kdy se využije integrační vlastnosti obvodu, nebo zakončením do kondenzátoru, který spolu s odporem tvoří RC člen. Tyto články v obvodu provádějí matematickou funkci integrování – napětí na výstupu je integrálem napětí na vstupu podle času.

Přesný popis návrhů Rogowského cívek, včetně obvodových prvků k měření, je podrobně popsán v této diplomové práci. Princip a problematiku měření Rogowského cívkou s pasivním zakončením vysvětluje první kapitola společně s popisem atmosférického proudového impulsu v časové i frekvenční oblasti. V následujících kapitolách je uveden výpočet obvodových prvků k měření atmosférického impulsu, návrh Rogowského cívek se zakončením do odporu a kondenzátoru, simulace na periodický signál i atmosférický výbojový proud tvaru vlny $8/20 \mu s$ a následné vyhodnocení návrhů zapojení.

2. Charakteristika měření impulsu proudu Rogowského cívkou

2.1 Princip Rogowského cívky

Je cívka ve tvaru toroidu bez feromagnetického obvodu, slouží jako součást elektrických měřicích přístrojů k měření impulzních proudů. Rogowského cívka nemá žádné jádro, řadí se mezi vzduchové cívky.



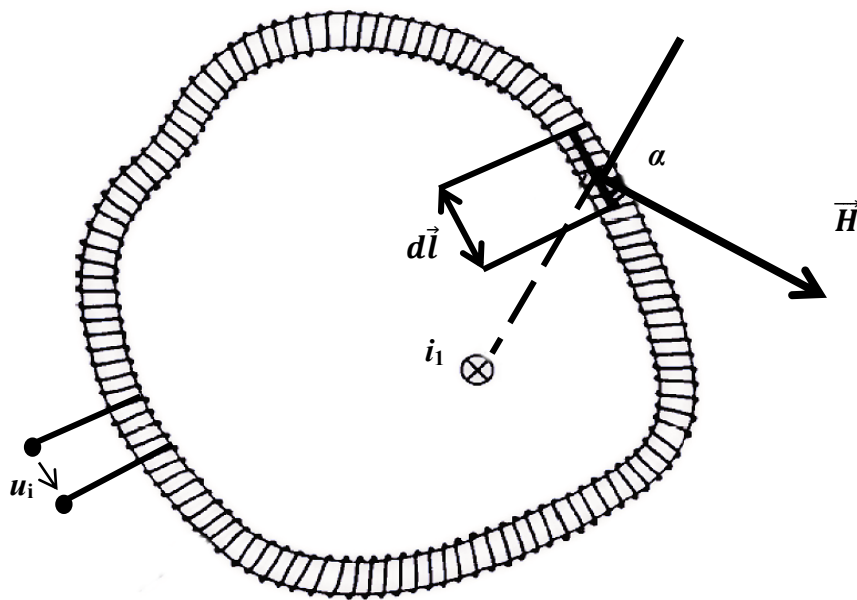
Obr. 2.1 Rogowského cívka

Měřený proud $i_1(t)$ protéká vodičem a Rogowského cívka tento vodič obepíná, jak je znázorněno na obrázku 2.1. S časově proměnným elektrickým proudem je v blízkosti vodičů spojeno nestacionární magnetické pole cívky. Toto pole indukuje v závitěch, které obepíná vodič, napětí u_i ve vodiči toroidní vzduchové (Rogowského) cívky. Výsledné napětí je tak úměrné změně magnetického toku, a tedy i hodnotě elektrického proudu, který ho vyvolal. Sekundární vinutí cívky je vzduchové, aby nemohlo ovlivňovat magnetické pole tvořené primárním vinutím. Výhodou Rogowského cívky je, že má magnetizační charakteristiku vzduchového jádra lineární v širokém rozsahu měřených proudů.

Matematický popis Rogowského cívky je charakterizován Ampérovým zákonem [1]:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I \quad (2.1)$$

Ampérův zákon vyjadřuje vztah mezi tokem elektrického proudu a magnetického pole kolem vodiče. Ampérův zákon se může taky formulovat cirkulací vektoru \vec{H} , který je roven celkovému proudu, jenž protíná integrální dráhu.



Obr. 2.2 Znázornění vektoru \vec{H}

Pro intenzitu magnetického pole cívky platí [1]:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} \quad (2.2)$$

Po odvození vztahu (2.1):

$$\frac{1}{\mu_0} \oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = I \quad (2.3)$$

Podle obrázku 2.2, kde je znázorněn vektor \vec{H} :

$$\oint \vec{H} \cdot \cos \alpha \cdot d\vec{l} = I \quad (2.4)$$

$d\vec{l}$ je úsek cívky, který je krátký, že se může zanedbat jeho křivost. Úsek délky $d\vec{l}$ má N závitů a jeho magnetizační tok bude [1]:

$$d\Phi = \mu_0 \cdot \vec{H} \cdot S \cdot N \cdot \cos \alpha \cdot d\vec{l} \quad (2.5)$$

\vec{H} je intenzita magnetické pole cívky, které svírá s úsekem cívky $d\vec{l}$ úhel α . Celkový magnetický tok Rogowského cívky je dán integrací podél cívky:

$$\Phi = \int d\Phi = \mu_0 \cdot N \cdot S \cdot \int \vec{H} \cdot \cos \alpha \cdot d\vec{l} = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot S \cdot i}{l} \quad (2.6)$$

Velikost indukované napětí v cívce, která je nasazená na vodič, bude dáno změnou magnetického toku cívky [1]:

$$u_i(t) = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{\mu_0 \cdot N \cdot S}{l} \cdot \frac{di}{dt} \quad (2.7)$$

Úpravou vztahu (2.7):

$$u_i(t) = -M \frac{di(t)}{dt} \quad (2.8)$$

Vzájemná indukčnost M se může definovat jako poměr vlastní indukčnosti k počtu závitů:

$$M = \frac{L}{N_2} \quad (2.9)$$

Výsledný signál, který reprodukuje aktuální časový průběh tvaru vlny primárního proudu z Rogowského cívky, se získá integrací indukovaného napětí. Rovnice 2.10 vyjadřuje vztah mezi měřeným proudem i_1 a výstupním napětím cívky u_2 , čímž se získá převodní vztah Rogowského cívky [1]:

$$i_1(t) = \frac{4l}{\pi \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot \mu_0 \cdot d_p^2} \cdot \int u_2(t) dt \quad (2.10)$$

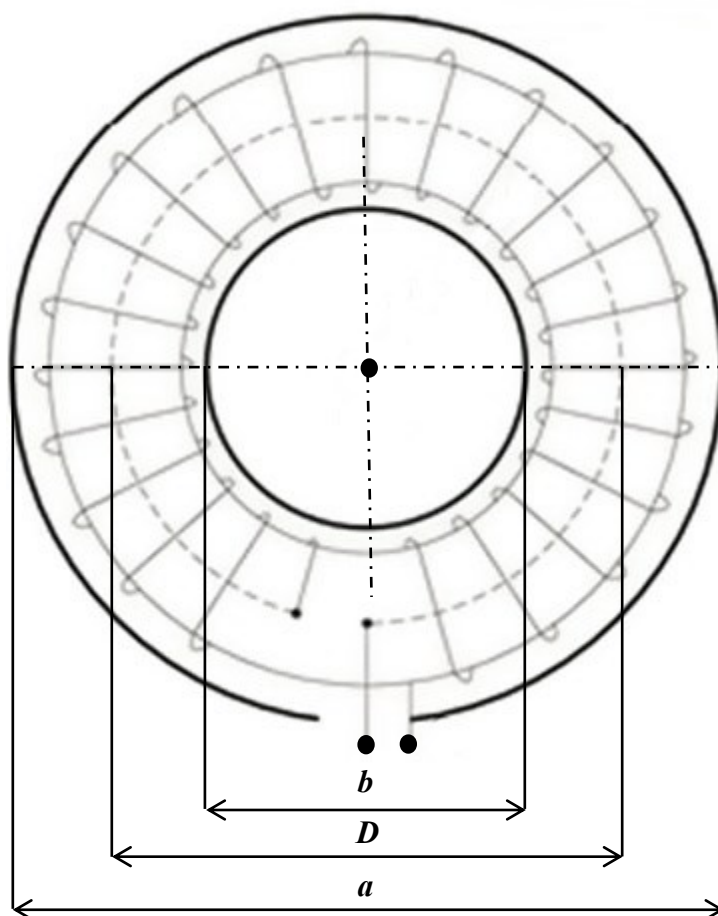
Měřený proud i_1 je přes konstantu přímo úměrný integrálu výstupního napětí u_2 , tedy musí být na výstupu cívky zapojen integrační člen. Integrovaný výstup přesně reprezentuje průběh měřeného proudu.

Integraci napěťového signálu můžeme provést:

- pasivním zakončením (RL , RC integrační články)
- aktivním zakončením (operační zesilovače)

Významnou vlastností Rogowského cívky je, že je potlačeno ovlivňování výstupního napětí proudy, které neobepínají magnetický obvod cívky. Výstupní napětí je dáno elektrickým proudem ve vodiči, který je obepnutý snímačem. Další výhodnou vlastností snímače je omezení vlivů magnetických toků kolmých na rovinu cívky a nezávislost výstupního napětí $u_2(t)$ na poloze měřeného vodiče v cívce.

2.2 Vinutí a geometrické parametry Rogowského cívky



Obr. 2.3 Geometrický náčrt Rogowského cívky

Legenda obrázku 2.3:

a – vnější rozměr cívky

b – vnitřní rozměr cívky

D – střední průměr cívky

V zadaných geometrických hodnotách a , b , D se vypočítá průměr prstence cívky:

$$d_p = \frac{a - b}{2} \quad (2.11)$$

Při znalosti hodnoty středního průměru cívky lze určit délku cívky:

$$l = \pi \cdot D \quad (2.12)$$

Pro další výpočet je nutné znát činitele plnění vinutí cívky, který lze vyjádřit součinem velikostí činitele tvaru vodiče k_t a činitele izolace k_i :

$$q = k_t \cdot k_i \quad (2.13)$$

V praxi při navíjení cívek se používá činitel plnění vinutí 0,9. Teoreticky je možný činitel plnění vinutí až 1, tedy bez vzdálenosti mezi jednotlivými závity.

Pokud je znám počet závitů vinutí a průměr vodiče, celková délka vodiče se vypočítá:

$$l_{cu} = N_2 \cdot \pi \cdot d_{cu} \quad (2.14)$$

Pro další postup řešení Rogowského cívky se určí odpor cívky, vlastní i vzájemná indukčnost a kapacita vinutí.

Odpor vinutí

Celkový odpor vinutí cívky je dán vztahem [1]:

$$R_r = \rho_{cu} \cdot \frac{l_{cu}}{S} = \rho_{cu} \cdot \frac{4 \cdot l_{cu}}{\pi d_{cu}^2} \quad (2.15)$$

Měrná rezistivita mědi $\rho_{cu} = 1,689 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m^{-1}$

Indukčnost vinutí

Indukčnost cívky lze vypočítat pro zadané rozměry [1]:

$$L_r = N_2^2 \cdot \mu_0 \cdot S = N_2^2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{\pi d_p^2}{4 \cdot l} \quad (2.16)$$

Permeabilita vakua $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H \cdot m^{-1}$

Rogowského cívka může mít širší toleranci indukčnosti. Požadovaná hodnota indukčnosti se dosazuje odvíjením závitů.

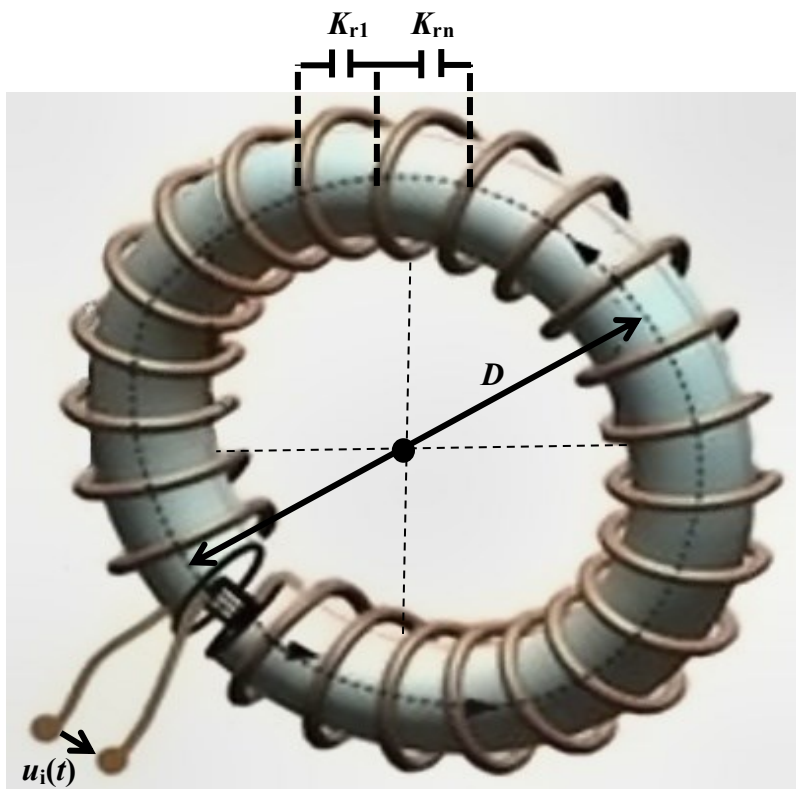
Vzájemná indukčnost

Vzájemná indukčnost je závislost mezi vinutím cívky a vodičem, kterým protéká měřený proud $i_1(t)$, lze jej určit ze vztahu:

$$M = N_1 \cdot N_2 \cdot \mu_0 \cdot S = N_1 \cdot N_2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{\pi d_p^2}{4 \cdot l} \quad (2.17)$$

Mezizávitová kapacita vinutí

Vznik parazitní kapacity ve vinutí Rogowského cívky je dán sériovou kombinací mezizávitových kapacit. Ty bohužel nejsou fyzicky změřit. Pokud je Rogowského cívka s jednovrstvým vinutím, lze vypočítat mezizávitovou kapacitu z návrhu cívky pomocí vzorce 2.18.



Obr. 2.4 Schéma mezizávitových kapacit vinutí Rogowského cívky

Výslednou kapacitu vinutí lze ovlivnit geometrickým rozměrem průměru prstence cívky, permitivitou impregnačního laku vodiče, průřezem vodiče a tloušťkou izolace vodiče.

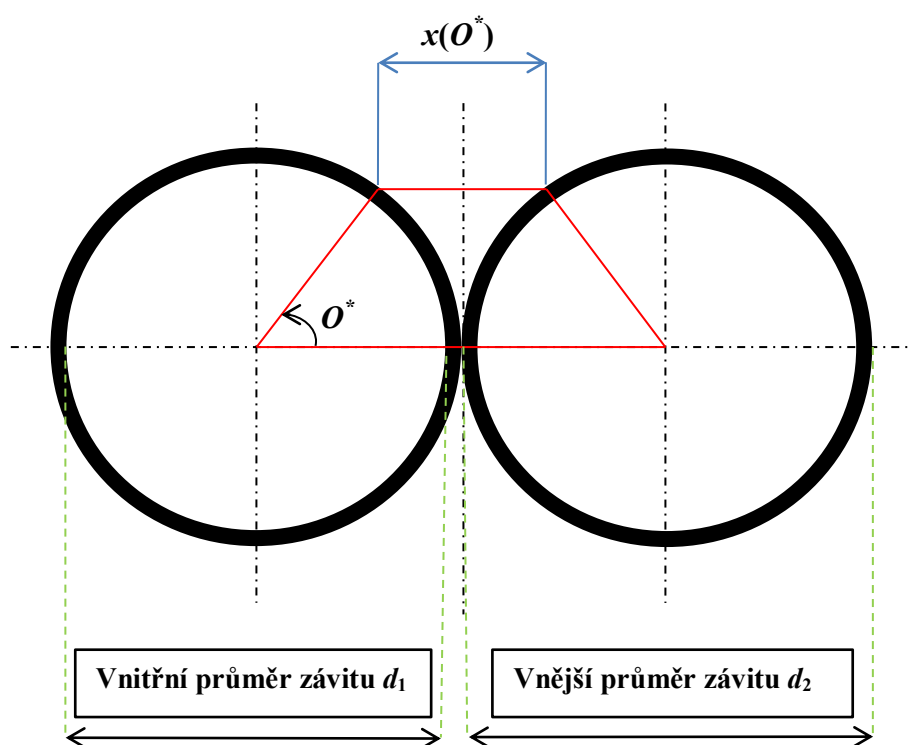
K zjištění velikosti kapacity je nutné znát:

Permitivitu vakua $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$

Permitivitu impregnačního laku ε_r

Tloušťku izolace vodiče b_i

Metodou stanovení velikosti mezizávitových kapacit se zabývá literatura [6]. Z řady závitů, patřících jedné vrstvě vinutí, jsou vyjmuty dva elementární závity (obrázek 2.5), mezi kterými je vypočítaná jejich vzájemná kapacita.

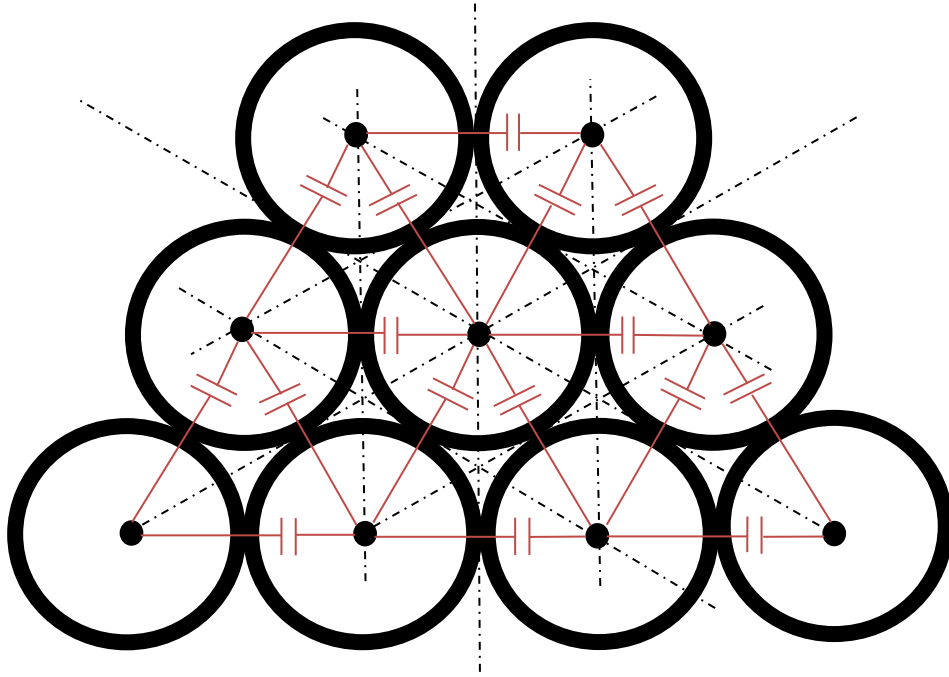


Obr. 2.5 Průběh elektrických siločar mezi dvěma závity

Siločáry z uspořádání, které je na obrázku 2.5, procházejí nejprve přes tenkou vrstvu izolace prvního závitu, dále vzduchovou mezerou a opět se vynoří přes izolaci druhého závitu do vodiče. Je-li výrazně menší tloušťka izolace vodiče, než je celkový poloměr jednoho závitu, lze předpokládat, že siločáry vstupují kolmo k povrchu vodiče. Stanovení cesty siločar ve vzduchové mezeře je výrazně složitější, a proto literatura [6] předpokládá nejkratší možnou cestu siločar. Výsledná kapacita se skládá ze sériového spojení dvou kapacit odpovídajících izolační vrstvě závitu a jedné kapacity vzduchové vrstvy. Na základě těchto předpokladů byl odvozen vztah pro celkovou mezizávitovou kapacitu vinutí prstencové cívky [6]:

$$K_r = \varepsilon_0 \cdot \pi D \cdot \left[\frac{\varepsilon_r \cdot O^*}{\ln\left(\frac{d_1}{d_2}\right)} + \cot g\left(\frac{O^*}{2}\right) \cot g - \cot g\left(\frac{\pi}{12}\right) \right] \quad (2.18)$$

$$\text{Kde: } O^* = \cos^{-1} \cdot \left[1 - \frac{\ln\left(\frac{d_1}{d_2}\right)}{\varepsilon_r} \right] \quad (2.19)$$



Obr. 2.6 Geometrické schéma představující mezivrstvou kapacitu třívrstvé cívky

Mezivrstvá kapacita je sérioparalelní zapojení kapacit vrstev vinutí cívky. Pomocí vztahu 2.18 a geometrických odvození z obrázku 2.6 lze určit ekvivalentní parazitní kapacitu dvouvrstvé cívky:

$$K_{rv2} = K_r + \frac{2K_r}{2} = 2K_r \quad (2.20)$$

Mezivrstvá kapacita třívrstvé cívky je dána vztahem [6]:

$$K_{rv3} = \frac{K_r}{2} + \frac{2K_r}{2} = \frac{3K_r}{2} \quad (2.21)$$

Jak je vidět z obrázku 2.6, má nejvyšší hodnotu mezivrstvá kapacita u dvouvrstvého vinutí cívky. Je to způsobeno tím, že má vyšší počet trojúhelníků než další vrstvy vinutí cívky. Se zvyšujícím se počtem vrstev vinutí se snižuje mezivrstvá kapacita vinutí [6]. Pro odvození mezivrstvé kapacity pro čtyři a pětivrstvé vinutí cívky se použijí pomocné vztahy 2.20 a 2.21 [6]:

$$K_{rv4} = \frac{K_r \cdot K_{rv2}}{2K_{rv2} + K_r} + K_r = \frac{7}{5} K_r \quad (2.22)$$

$$K_{rv5} = \frac{K_r \cdot K_{rv3}}{2K_{rv3} + K_r} + K_r = \frac{11}{8} K_r \quad (2.23)$$

2.3 Charakteristika proudového impulsu

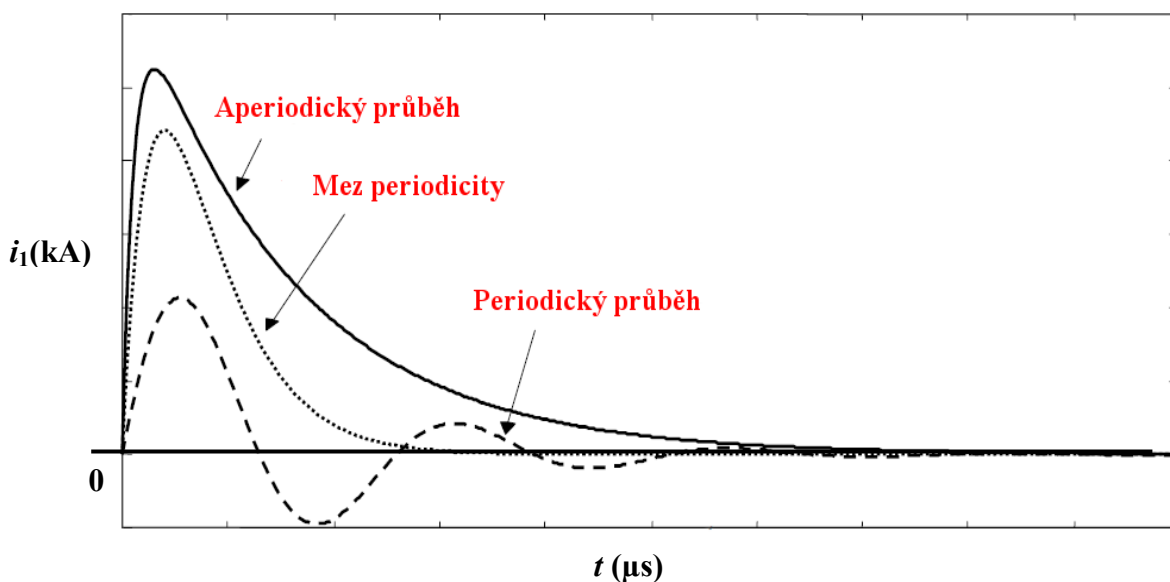
K vytvoření impulzního proudu slouží impulzní generátor, který vhodným zapojením RLC součástek vytvoří impulzní proud.

Pro impulzní proud se používají čtyři tvary proudových impulsů:

- impuls 1/20: doba čela 1 μs ; doba půltýlu 20 μs
- impuls 4/10: doba čela 4 μs ; doba půltýlu 10 μs
- impuls 8/20: doba čela 8 μs ; doba půltýlu 20 μs
- impuls 30/80: doba čela 30 μs ; doba půltýlu 80 μs

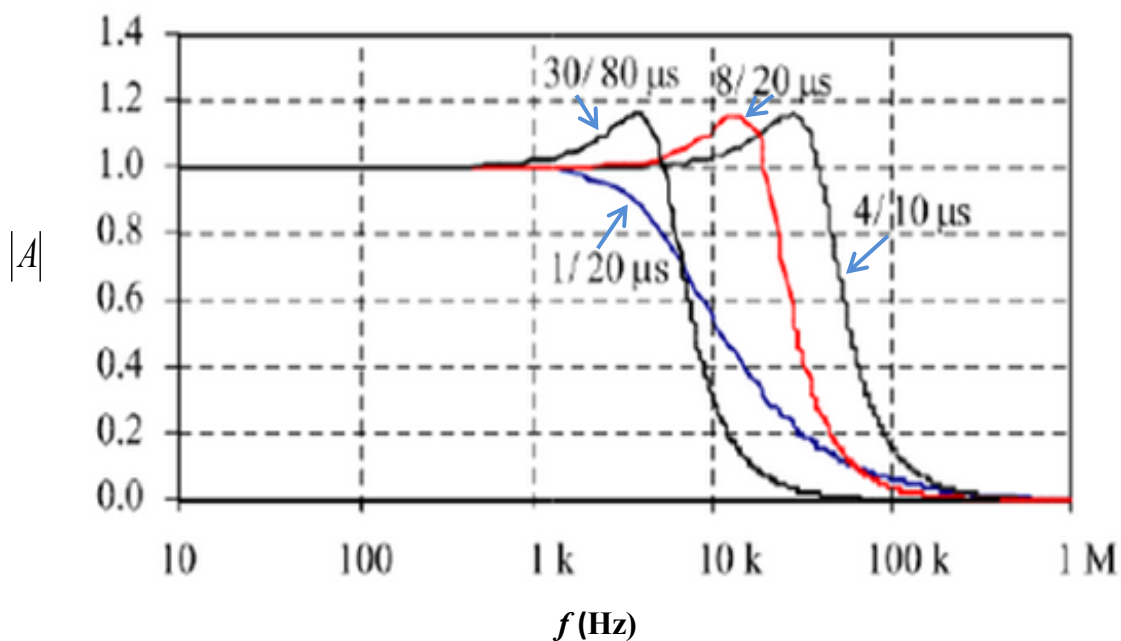
Proudový impuls může mít průběhy děje:

- aperiodický
- periodický tlumený
- mez periodicity



Obr. 2.7 Druhy průběhů impulzní proudové vlny

Níže uvedený obrázek 2.8 popisuje přenos proudových impulsů ve frekvenční oblasti. Frekvenční spektrum impulsu je třeba vzít v úvahu tak, aby bylo dosaženo přesného měření Rogowského cívky, a to vhodným zvolením obvodových prvků. Podle obrázku 2.8 je přenos impulzní vlny v rozmezí 8 kHz a končí 40 kHz, tato frekvence je závislá na hodnotách RLC prvků v obvodu a jejich kombinací. Dále je zřejmé, že kolem frekvence 30 kHz ztrácí vlna svou energii. V dalším řešení návrhu Rogowského cívky je použit periodický tlumený proudový impuls tvaru vlny 8 / 20 μs .



Obr. 2.8 Frekvenční spektra přenosu proudových impulzů

Popis atmosférického periodického tlumeného proudového impulsu 8 / 20 μ s

Tvar proudového impulsu je charakterizován rychlým nárůstem z nulové do vrcholové hodnoty a následným poklesem k nule. Tento typ periodického tlumeného průběhu impulsu znázorňuje (obr. 2.9) a je definován maximální amplitudou I_m , dobou čela T_1 i dobou půltýlu T_2 .

Náběh vlny:

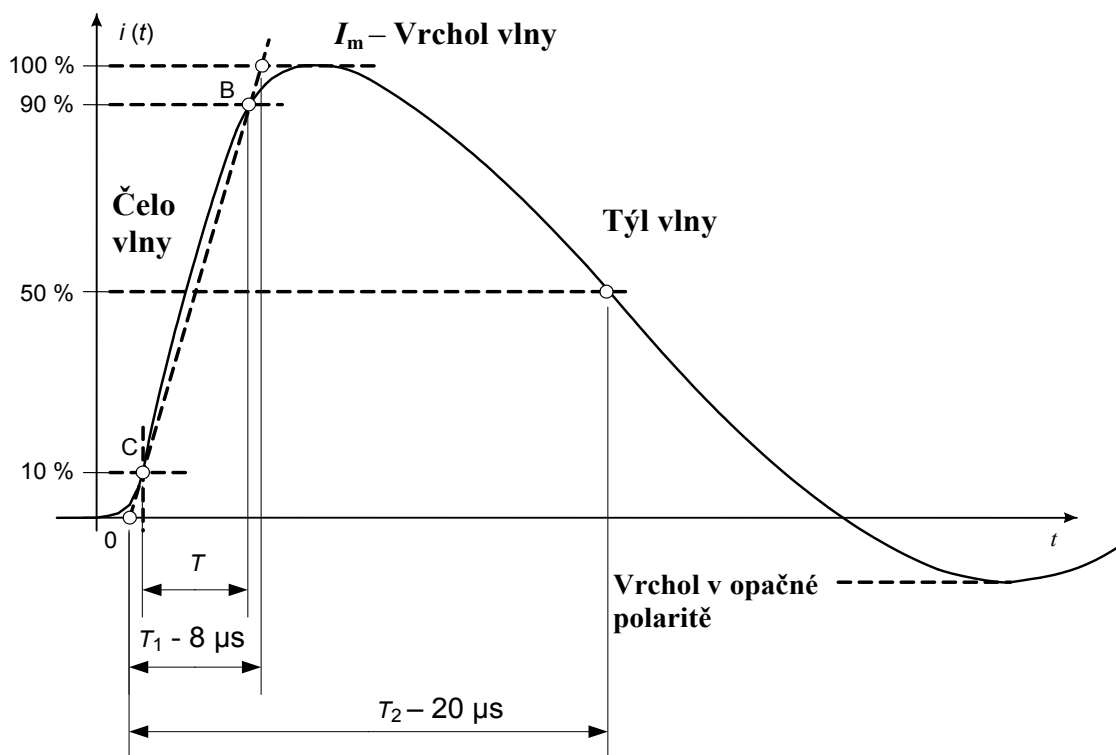
Čelo vlny – část vlny proudu před vrcholem

Doba vrcholu – časový úsek mezi počátkem vlny a jejím vrcholem (šipka T_1)

Doba čela vlny – je to 1,25 násobek doby vzrůstu proudu mezi body 10 % a 90 %

Doba trvání vrcholu proudu – časový interval, v němž je proud vyšší než 0,9 násobek vrcholové hodnoty

Strmost čela vlny – poměr vrcholové hodnoty a doby čela vlny



Obr. 2.9 Periodický atmosférický proudový impulz 8/20 μs

Týl vlny:

Část vlny, kdy je proud za vrcholem.

Doba půltýlu vlny – časový interval mezi začátkem vlny a okamžikem v týlu, kdy proud klesne na polovinu vrcholové hodnoty (šipka T_2)

Tolerance:

Vrcholová hodnota $I_m \pm 10\%$

Doba čela $T_1 \pm 10\%$

Doba půltýlu $T_2 \pm 10\%$

Převodem z časové oblasti do frekvenčního spektra lze určit z níže uvedených odvozených vzorců šířku přenášeného pásma pro impulzní vlnu.

Pro náběh impulsu v časové oblasti T_1 :

$$T_1 = t_{90} - t_{10} = \tau_h \left(\ln \frac{1}{0,1} - \ln \frac{1}{0,9} \right) = 2,2 \cdot \tau_h = 2,2 \cdot R_g C_g = 8 \mu s \pm 10 \% \quad (2.24)$$

Pro spádovou oblast impulsu v časové oblasti T_2 :

$$T_2 = t_{50} - t_{10} = \tau_d \left(\ln \frac{1}{0,1} - \ln \frac{1}{0,5} \right) = 1,61 \cdot \tau_d = 1,61 \cdot \frac{L_g}{R_g} = 20 \mu s \pm 10 \% \quad (2.25)$$

Potřebná frekvence pro náběžnou hranu impulsu v diskretní oblasti:

$$f_d = \frac{1}{2\pi \cdot T_2} = \frac{1}{2\pi \cdot 20 \cdot 10^{-6}} = 8 \text{ kHz} \quad (2.26)$$

Určení konstanty α ve frekvenční oblasti:

$$\alpha = 2\pi \cdot f_d = 2\pi \cdot 8 \cdot 10^3 = 50240 \text{ s}^{-1} \quad (2.27)$$

Frekvence pro spádovou hranu impulsu v diskretní oblasti:

$$f_h = \frac{2}{2\pi \cdot T_1} = \frac{2}{2\pi \cdot 8 \cdot 10^{-6}} = 40 \text{ kHz} \quad (2.28)$$

Určení konstanty β ve frekvenční oblasti:

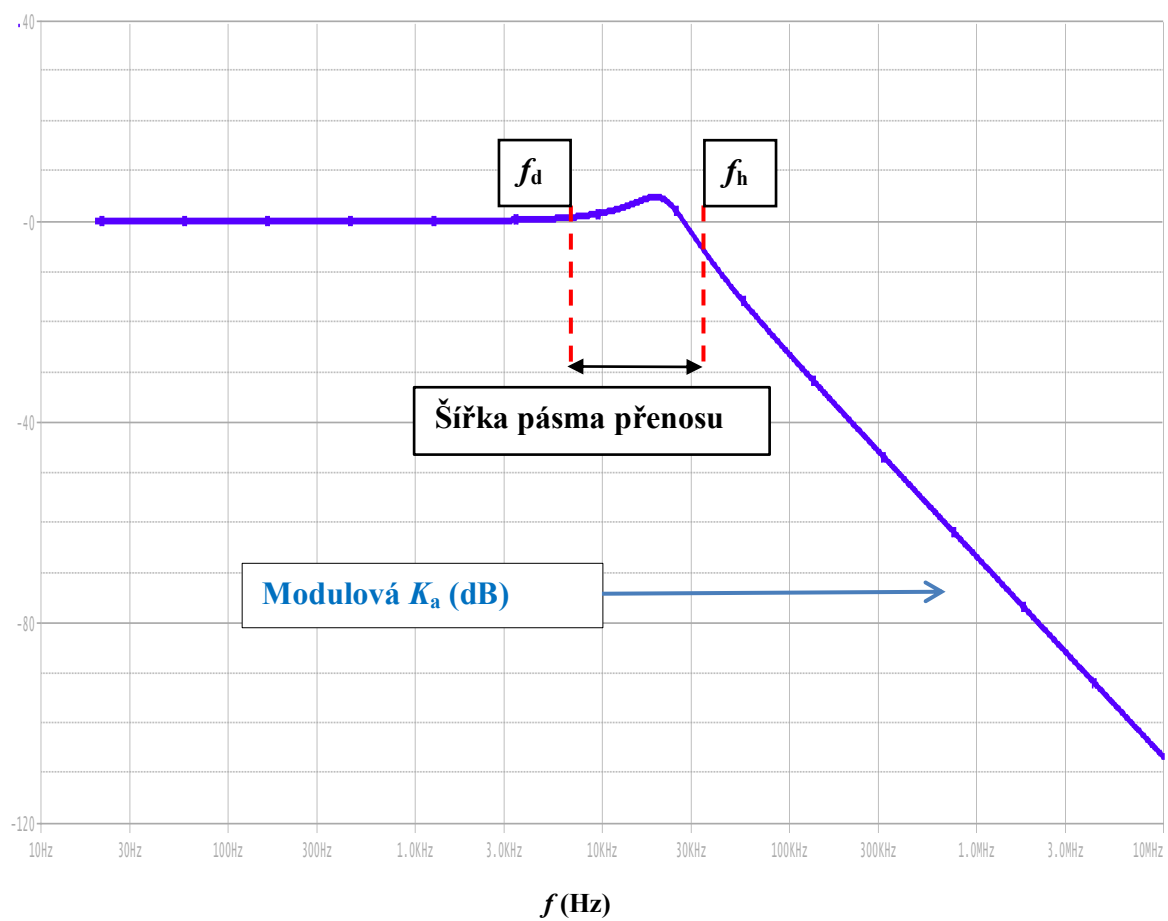
$$\beta = 2\pi \cdot f_h = 2\pi \cdot 40 \cdot 10^3 = 251327 \text{ s}^{-1} \quad (2.29)$$

α a β jsou konstanty, charakterizující náběžnou a spádovou hranu impulsu pro jednotkový impuls $8/20 \mu s$ ve frekvenční oblasti.

$$\alpha = 50240 \text{ s}^{-1} \quad \beta = 251327 \text{ s}^{-1}$$

Šířku pásma přenosu atmosférické impulzní vlny lze určit ze vztahů 2.26 a 2.28:

$$B_s = \left(\frac{2}{2\pi \cdot T_1} \right) - \left(\frac{1}{2\pi \cdot T_2} \right) = f_h - f_d \quad (2.30)$$



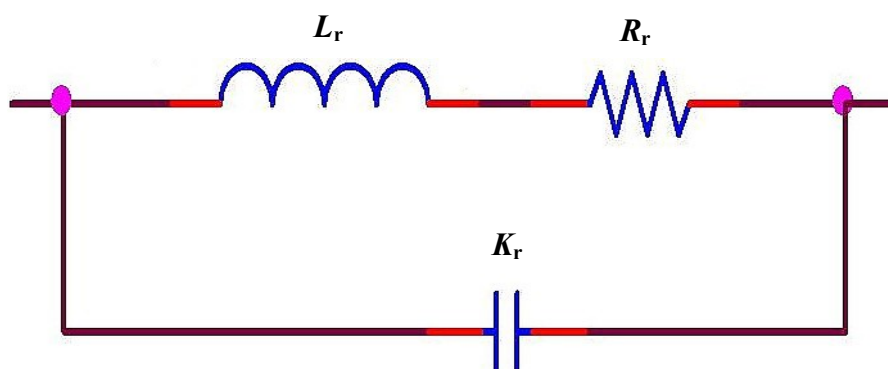
Obr. 2.10 Modulové frekvenční spektrum impulzní proudové vlny v programu Pspice

Zvolený periodický tlumený impulzní proud $8/20 \mu\text{s}$ je vykreslen na obrázku 2.10 pomocí programu Pspice a znázorňuje průběh převedeného signálu z časové oblasti do frekvenčního pásma přenosu.

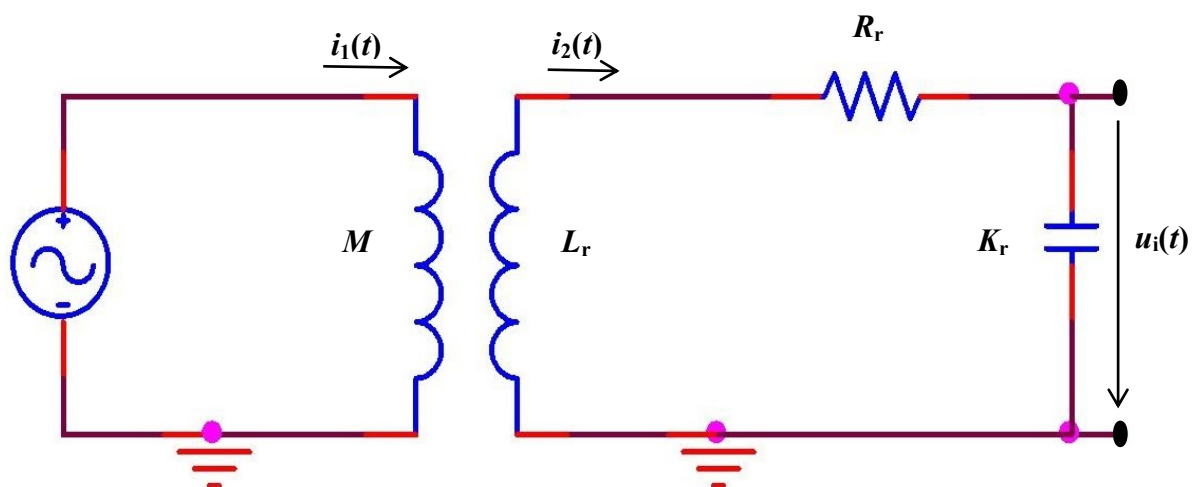
2.4 Modelové schéma Rogowského cívky

Rogowského cívku považujeme za obvod se soustředěnými parametry, protože vlnová délka λ je daleko větší než geometrický rozměr Rogowského cívky $\lambda \gg l$, vycházející z podmínky a vztahu 2.31:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (2.31)$$



Obr. 2.11 Modelové náhradní schéma Rogowského cívky

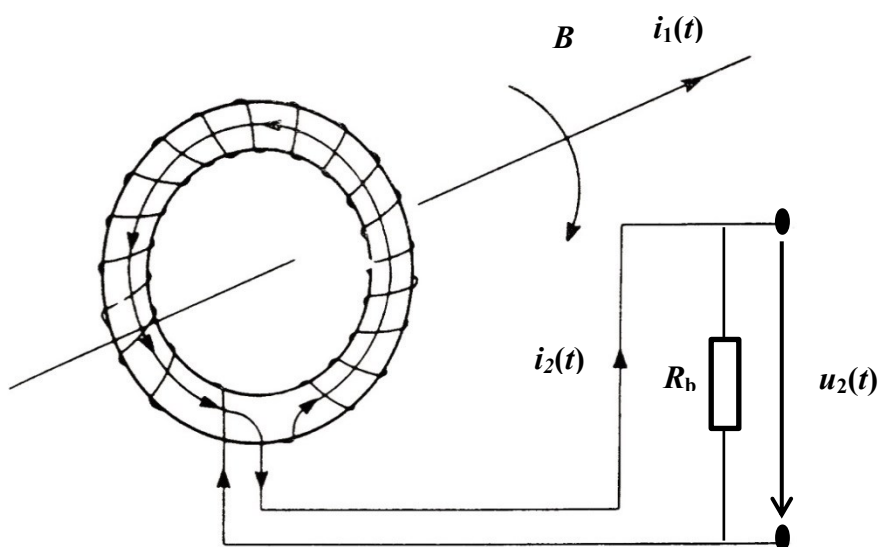


Obr. 2.12 Obvodové náhradní schéma měřicí cívky

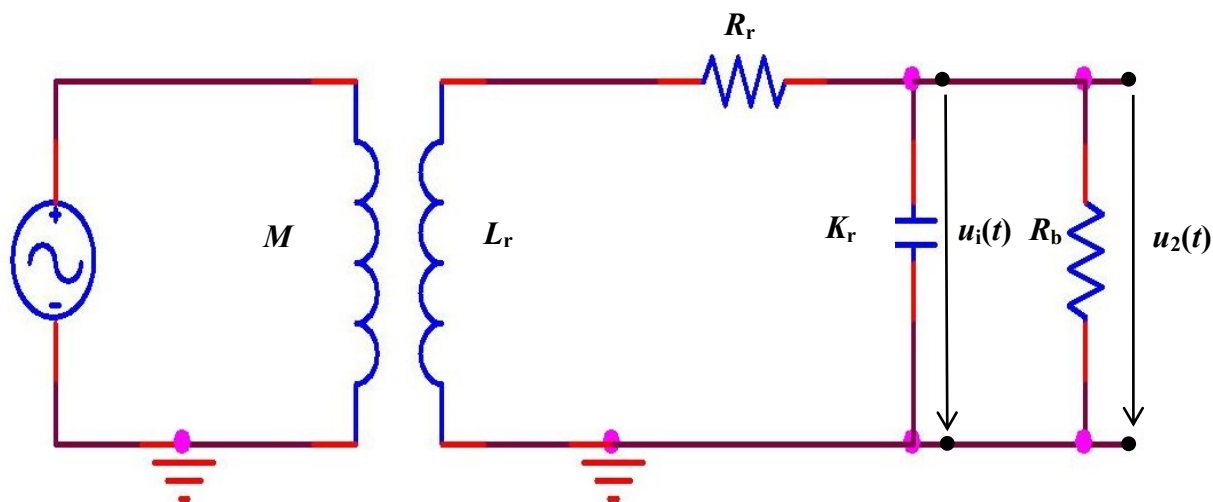
Tento měřicí sekundární obvod je obecně sérioparalelní zapojení obvodových prvků z obrázku 2.12 a protéká jím sekundární proud $i_2(t)$ za předpokladu, že $i_2(t) \ll i_1(t)$ je vliv sekundárního obvodu na výbojový atmosférický proud zanedbatelný. Pro měření výbojových impulzních proudů rozeznáváme dva druhy zapojení Rogowského cívky, buď zakončením do odporu, nebo zakončením do kondenzátoru. Obě varianty jsou popsány v kapitolách 2.5 a 2.6.

2.5 Charakteristika Rogowského cívky se zakončením do odporu

Na obrázku 2.13 je reálné zapojení Rogowského cívky se zakončením do odporu. Zapojení se rozloží na soustředěné parametry obvodu, které jsou na obrázku 2.14.



Obr. 2.13 Rogowského cívka se zakončením do odporu



Obr. 2.14 Obvodové náhradní schéma zapojení Rogowského cívky s odporem R_b

Obrazový přenos obvodu pomocí operátorské funkce [4]:

$$K_{(p)} = \frac{U_i(p)}{I_1(p)} = \frac{Mp}{L_r K_r p^2 + \left(\frac{L_r}{R_r} + K_r \cdot R_r \right) p + R_r + 1} \quad (2.32)$$

Při uvažování formálního přechodu od analýzy obvodu v operátorové oblasti k analýze obvodu v harmonickém ustáleném stavu platí $p = j\omega$. Měřením signálu s vyšším kmitočtem a nízké velikosti zatěžovacího odporu lze vyjádřit vztah 2.32 a zjednodušit na tvar:

$$K_{(p)} = \frac{U_2(p)}{U_1(p)} = \frac{R_b}{pL_r} \quad (2.33)$$

Řešení obvodu je možné i v časové oblasti, kterou popisuje diferenciální rovnice [3]:

$$M \cdot \frac{di_1(t)}{dt} = -(i_2 \cdot (R_r + R_b) + L_r \frac{di_2(t)}{dt} + \frac{1}{K_r} \int_0^t i_2(t) dt) \quad (2.34)$$

Když je mezizávitová kapacita vyzkratovaná, pak platí podmínky [3]:

$$\frac{\omega_d \cdot L_r}{(R_b + R_r)} \gg 1, \quad L_r \frac{di_2}{dt} \gg (R_b + R_r) \cdot i_2 \quad (2.35)$$

Platí-li výše uvedené podmínky, jsou výstupní napětí z odporu bočníku a převodní konstanta zapojení určeny vztahem [3]:

$$u_2(t) = (R_b + R_r) \cdot i_2 = R_v \cdot i_2 = \frac{R_v M}{L_r} \cdot i_2 = k_2 \cdot i_1 \quad (2.36)$$

Přenos je platný pouze v oblasti kmitočtů ležících nad dolním mezním kmitočtem obvodu, jak naznačuje obrázek 2.15. Dolní mezní kmitočet snímače je dán časovou konstantou τ_d sekundárního vinutí:

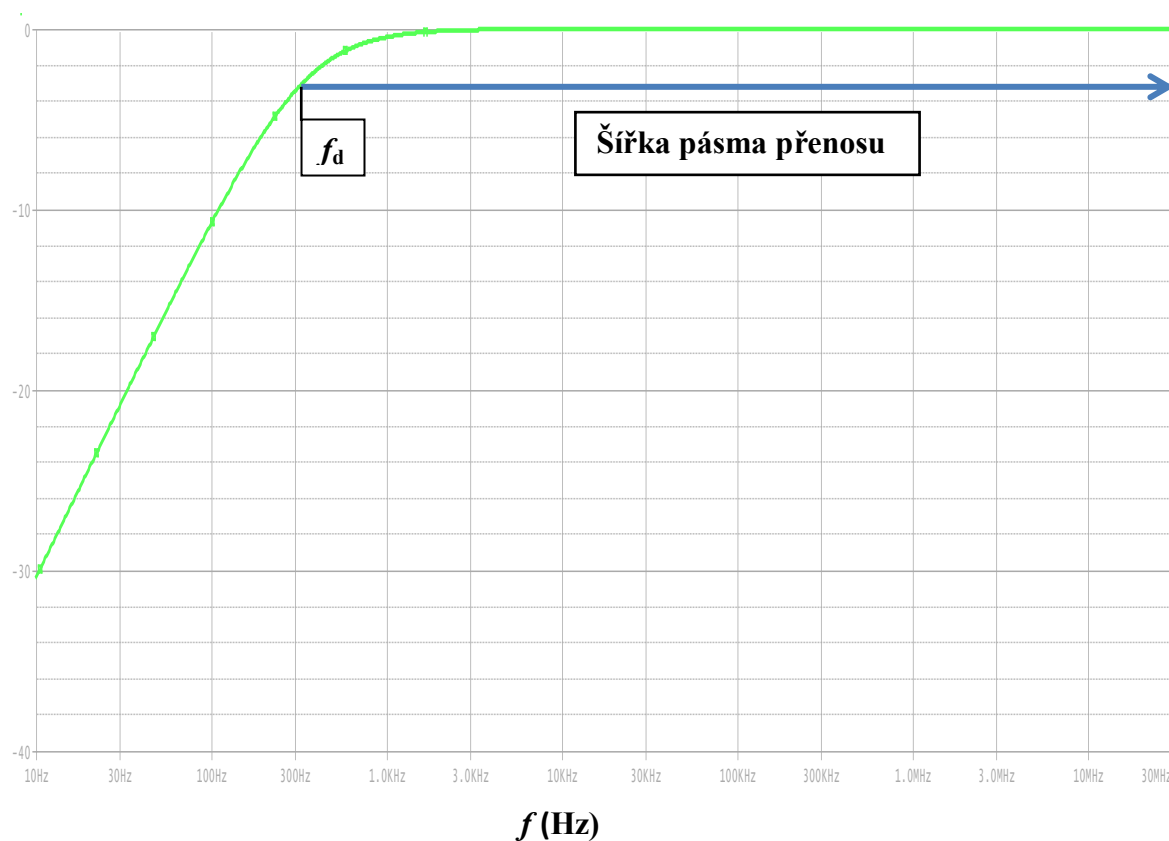
$$\tau_d = \frac{L_r}{R_v} \quad (2.37)$$

Úpravou vzorce 2.37 je výsledný dolní kmitočet snímače:

$$f_d = \frac{1}{2\pi \cdot \tau_d} = \frac{R_v}{2\pi \cdot L_r} \quad (2.38)$$

Horní mezní kmitočet celého snímače je teoreticky nekonečně vysoký, ale pouze za předpokladu, že odpor bočníku je malý. Tehdy se neuplatní parazitní kapacita vinutí, protože je parazitní kapacita vyzkratována bočníkem. Se zvyšujícím se zatěžujícím odporem bočníku se projevuje mezizávitová nebo mezivrstvá kapacita vinutí a tvoří časovou konstantu, kterou je určen horní mezní kmitočet zapojení, je určen vztahem 2.39.

$$f_h = f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{L_r \cdot K_r}} \quad (2.39)$$



2.15 Modulový přenos s mezním dolním kmitočtem

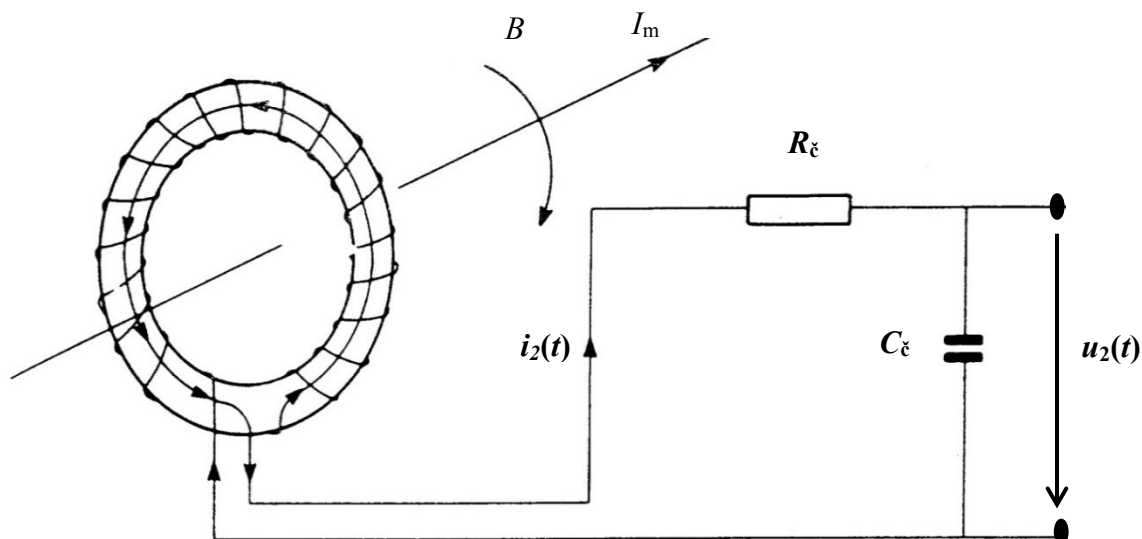
Ve skutečnosti lze obtížně realizovat odporový bočník, který by neměl parazitní sériovou indukčnost. Tato indukčnost tvoří s výsledným odporem zapojení časovou konstantu, z které může být určen horní mezní kmitočet:

$$f_h = \frac{1}{2\pi \cdot \tau_h} = \frac{R_v}{2\pi \cdot L_p} \quad (2.40)$$

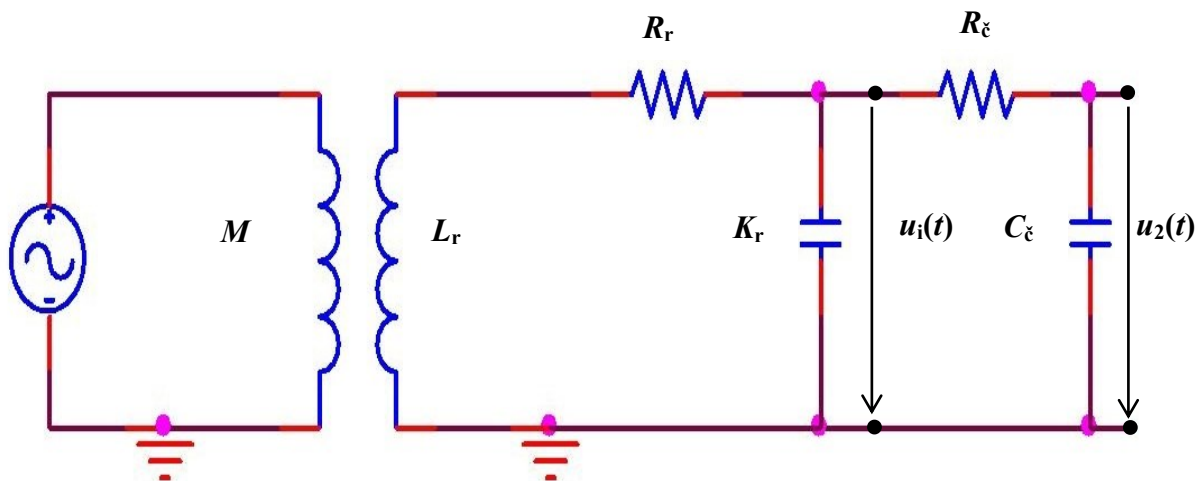
Nad tímto kmitočtem se začíná bočník chovat jako derivační člen a signál je nepoužitelný pro měření. Proto při návrhu zapojení by měl být zatěžující odpor bez induktivního charakteru.

2.6 Charakteristika Rogowského cívky se zakončením do kondenzátoru

Na obrázku 2.16 je reálné zapojení Rogowského cívky s RC integračním členem. Zapojení se může rozložit na obvodové prvky, které jsou na obrázku 2.17.



Obr. 2.16 Rogowského cívka s RC článkem



Obr. 2.17 Obvodové náhradní schéma zapojení Rogowského cívky s RC článkem

Obrazový přenos obvodu pomocí operátorské funkce [5]:

$$K_{(p)1} \frac{U_i(p)}{I_1(p)} = \frac{Mp}{L_r K_r p^2 + \left(\frac{L_r}{R_r} + K_r R_r \right) p + R_r + 1} \quad (2.41)$$

$$K_{(p)2} = \frac{U_i(p)}{U_2(p)} = \frac{1}{p R_\epsilon C_\epsilon + 1} \quad (2.42)$$

$$K_{(p)} = \frac{Mp}{(p R_\epsilon C_\epsilon + 1) \cdot (\sqrt{R_r L_r K_r})^2 p^2 + 2 \left(\frac{L_r + R_r K_r}{\sqrt{L_r R_r K_r}} \right) p + 1} \cdot I_1(p) \quad (2.43)$$

Řešení obvodu je možné i v časové oblasti, kterou popisuje diferenciální rovnice [3]:

$$M \cdot \frac{di_1(t)}{dt} = -(i_2 \cdot R_v + L_r \frac{di_2(t)}{dt}) + \frac{1}{C_v} \int_0^t i_2(t) dt \quad (2.44)$$

Jsou-li v požadovaném rozsahu kmitočtu splněny podmínky [3]:

$$R_v i_2 \gg L_r \frac{di_2(t)}{dt}, \quad R_v i_2 \gg \frac{1}{C_v} \int_0^t i_2(t) dt \quad (2.45)$$

Pak výstupní napětí z RC článku a převodní konstantu zapojení lze určit z rovnice [3]:

$$u_2(t) \cong \frac{1}{C_v} \cdot \int_0^t i_2(t) dt = \frac{M}{R_v C_v} \cdot i_2 = k_2 \cdot i_1 \quad (2.46)$$

Protože se v tomto případě jedná o integrátor pasivní, který není dokonalý, je v rovnici 2.46 použito znaménko přibližnosti. Z rovnice 2.46 lze přenos Rogowského snímače definovat jako přenosová impedance naprázdno. Tento přenos je platný pouze v oblasti kmitočtů ležících mezi dolním a horním mezním kmitočtem. Pomocí vzorců lze určit mezní kmitočty, které určují pásmo přenosu snímače.

Dolní mezní kmitočet snímače závisí hlavně na RC článku:

$$f_d = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_\epsilon \cdot C_\epsilon} \quad (2.47)$$

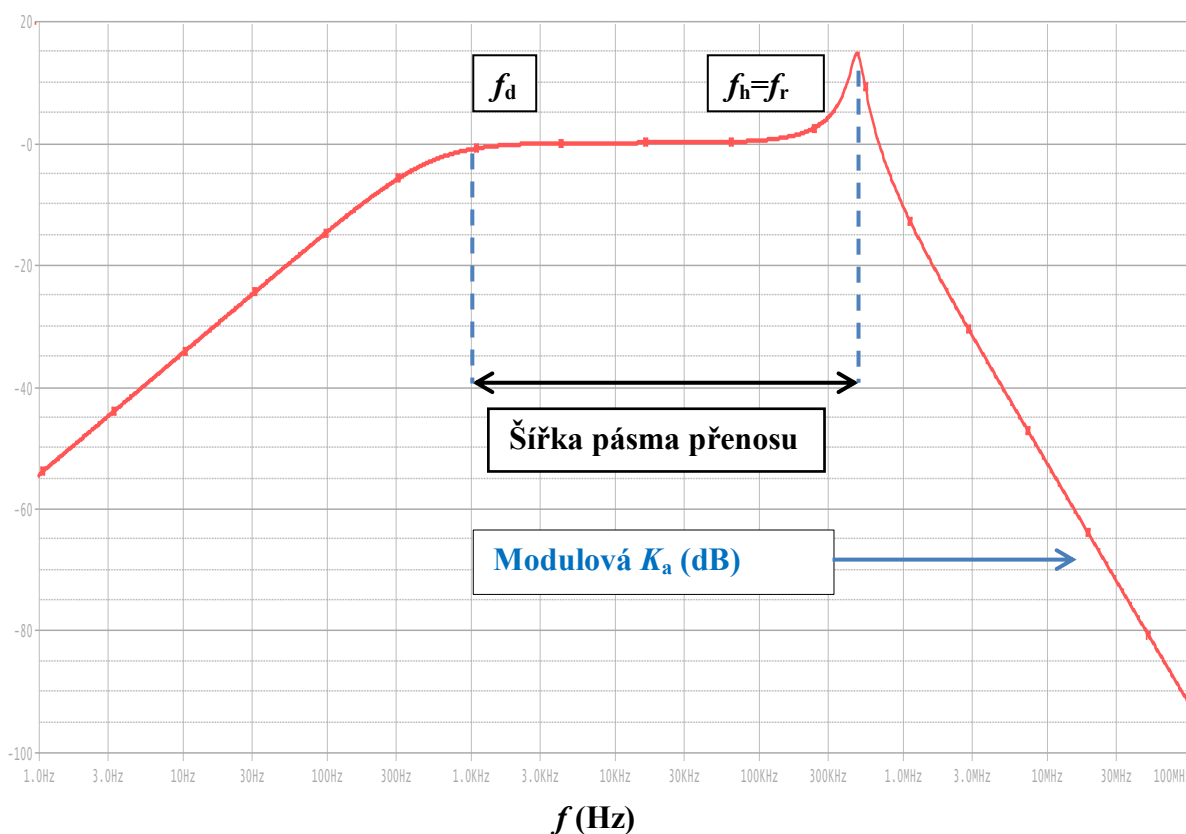
Horní mezní kmitočet ovlivňuje indukčnost a mezizávitová kapacita vinutí cívky, vztah pro výpočet mezního kmitočtu zapojení je dán:

$$f_r = f_h = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_r K_r}} \quad (2.48)$$

Ze vztahu 2.48 je patrné, že při požadavku na vyšší mezní kmitočet je nutné snížit počet závitů vinutí Rogowského cívky a průměr prstence toroidu, což může zmenšit citlivost celého snímače. Horní mezní kmitočet, kde již integrátor ztrácí svoji integrační schopnost, je závislý hlavně na velikosti kapacity vinutí a snižování kapacity vede k vyšší frekvenci obvodu. Jak vyplývá z obrázku 2.18, dochází v okolí rezonančního kmitočtu obvodu k nejvyššímu zesílení. Přítomností integračního členu klesá nad kmitočtem f_h frekvenční charakteristika zapojení, se sklonem -20 dB/dek, jak je naznačeno na obrázku 2.18.

Šířku pásma snímače je možno vypočítat rozdílem horní a dolní mezní frekvence:

$$B_s = \left(\frac{1}{2\pi\sqrt{L_r \cdot K_r}} \right) - \left(\frac{1}{2\pi \cdot R_c C_c} \right) = f_h - f_d \quad (2.49)$$



2.18 Charakteristika přenosu s mezními kmitočty

2.7 Shrnutí vlastností měření Rogowského cívky s pasivním zakončením

Hodnota výstupního napětí z cívky závisí na vzájemné indukčnosti M a proud i_2 v obvodu je omezen její indukčností a připojenou zátěží. Napěťový signál $u_i(t)$ je časovým obrazem derivace proudu. Pokud se má signál vyhodnotit, je nutné připojit na svorky cívky integrační článek. Indukované napětí je fázově posunuté k měřenému proudu o 90° , i z toho důvodu se musí zapojit integrační obvod, čímž zároveň dojde k fázovému posuvu a fáze měřeného proudu a výstupní napětí budou shodné. K integraci je možné použít RC článek nebo využít integrační vlastností cívky. Tento obvod také slouží k impedančnímu oddělení. Pro měření výbojových proudů $8/20 \mu s$, který má frekvenční přenos od 8 do 40 kHz je nutné, aby přenos této vlny ve frekvenční oblasti byl na vodorovném pásmu modulového přenosu celého zapojení obvodu, jak je to patrné z obrázku 2.15 a 2.18.

Zakončení Rogowského cívky odporem

Na výstup z Rogowského cívky se zapojí pouze odpor R_b , kde se snímá výstupní napětí $u_2(t)$. Časová konstanta obvodu je závislá na parametrech cívky. Cívka tedy musí mít mále hodnoty vlastního odporu R_r vzhledem ke své indukčnosti L_r . Toho lze docílit vyšším průřezem vodiče a nižším počtem závitů. Připojený odpor R_b musí být co nejnižší velikosti pro zachování integrační vlastnosti obvodu. V tomto zapojení může být proud $i_2(t)$ zatížen systematickou chybou - i_μ , výsledné měření tedy nemusí být přesné, protože je cívka ve stavu nakrátko a z vnitřního prostoru cívky je vytlačován magnetizační tok ven, mimo cívku. Systematická chyba - i_μ , negativně ovlivňuje prostorové rozložení původního toku [1].

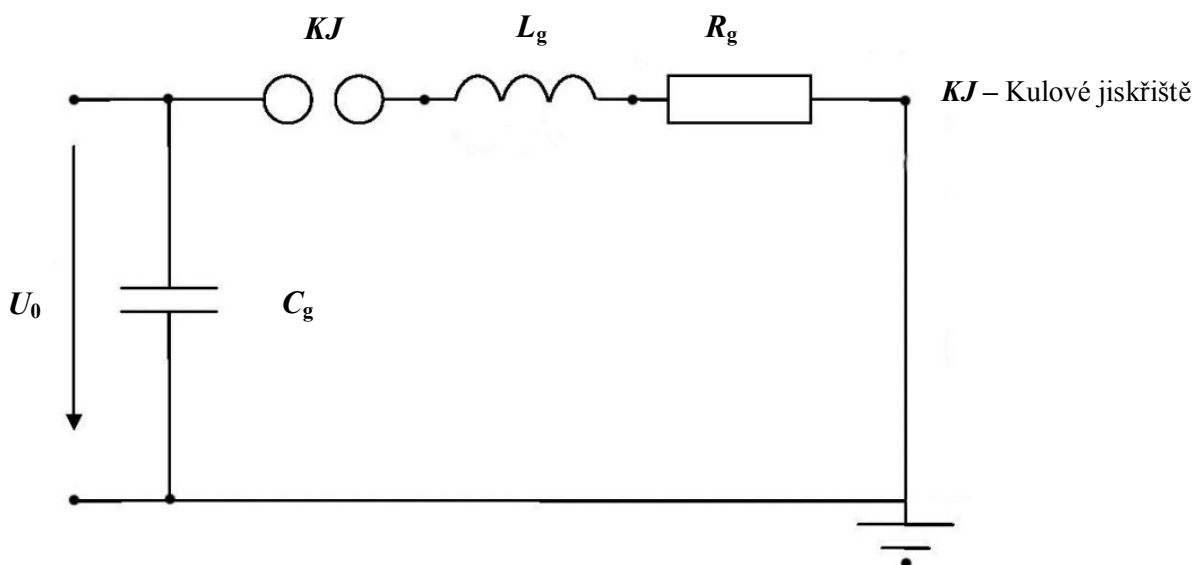
Zakončení Rogowského cívky kondenzátorem

Na výstup z Rogowského cívky se připojí integrační RC článek, kde se na kondenzátoru změří výstupní napětí $u_2(t)$. V zapojení musí mít cívka co nejmenší velikost vlastního odporu, indukčnosti a kapacity. Toto splňuje vinutí s nižším průměrem vodiče. V tomto zapojení je Rogowského cívka v režimu naprázdno a je naprosto přesným snímačem proudu, který není zatížen systematickou chybou, jako v případě měření do odporu R_b . Chyba snímače s tímto zapojením bývá nižší než 1 %. Podmínkou pro výše uvedenou přesnost snímače je splnitelnost nerovnosti d_p (průměr prstence) $\ll D$ (střední průměr cívky) geometrických rozměrů cívky.

3. Obvodové prvky měření pro atmosférický proudový impuls

3.1 Návrh obvodových prvků generátoru impulzního proudu

K vytvoření atmosférického proudového impulsu se použije RLC generátor, který simuluje periodické tlumené výbojové impulzní proudy tvaru $8 / 20 \mu s$. Generátor představuje z obvodového hlediska sériové spojení sériového obvodu, který se skládá z kondenzátoru s celkovou kapacitou C_g , z indukčnosti L_g a odporu R_g . Náhradní matematické schéma impulzního generátoru proudu je na obrázku 3.1.



Obr. 3.1 Náhradní schéma zapojení impulzního generátoru

Napětím U_0 se nabíjí kondenzátor C_g a kulové jiskřiště se bude chovat jako spínač a kondenzátor C_g jako zdroj napětí. Velikost napětí na kondenzátoru bude známa, protože je to nastavená hodnota napětí na zdroji. Krátkodobé impulzy proudů se získávají pomocí výboje z nabitých vysokonapětových kondenzátorů a spínacím jiskřištěm dochází k jejímu vybití do sériově spojeného odporu a cívky.

Pro generování atmosférického impulsu proudu budou hodnoty RLC prvků:

$$R_g = 3 \Omega, L_g = 37 \mu H, C_g = 1,5 \mu F$$

Počáteční podmínky pro napětí v RLC obvodu:

$$u_{C_g}(t) + u_{L_g}(t) + u_{R_g}(t) = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{1}{C_g} \int_0^t i(t) dt + u_{C_g}(0) + L_g \frac{di(t)}{dt} + R_g \cdot i(t) = 0 \quad (3.2)$$

Při označení průběhu d [2]:

$$d = 2 \cdot \frac{\sqrt{\frac{L_g}{C_g}}}{R_g} = 2 \cdot \frac{\sqrt{\frac{37 \cdot 10^{-6}}{1,5 \cdot 10^{-6}}}}{3} = 3,31 > 1 \quad (3.3)$$

Podmínka pro periodický tlumený průběh $d > 1$. Výbojový proud bude mít periodický tlumený průběh, protože d je vyšší než jedna. Při znalosti velikosti první amplitudy proudu $I_{m1} = 5$ kA se vypočítá velikost nabíjeného napětí:

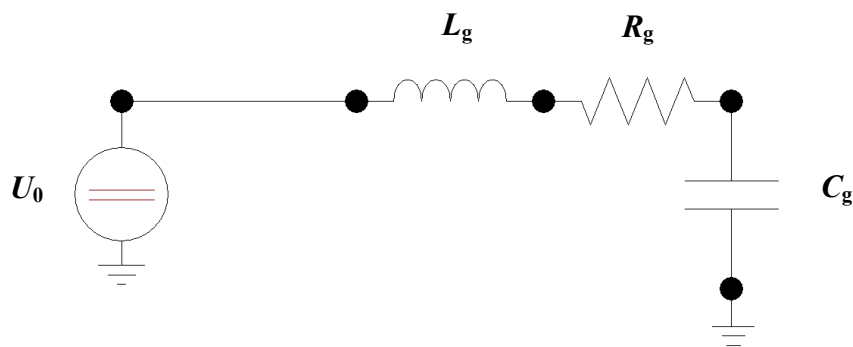
$$U_0 = I_{m1} \cdot \sqrt{\frac{L_g}{C_g}} \cdot \exp\left[-\frac{\arctg(\sqrt{d^2-1})}{\sqrt{d^2-1}}\right] = 5 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{\frac{37 \cdot 10^{-6}}{1,5 \cdot 10^{-6}}} \cdot \exp\left[-\frac{\arctg(\sqrt{3,31^2-1})}{\sqrt{3,31^2-1}}\right] \cong 37 \text{ kV} \quad (3.4)$$

Druhá amplituda proudového impulsu má velikost [2]:

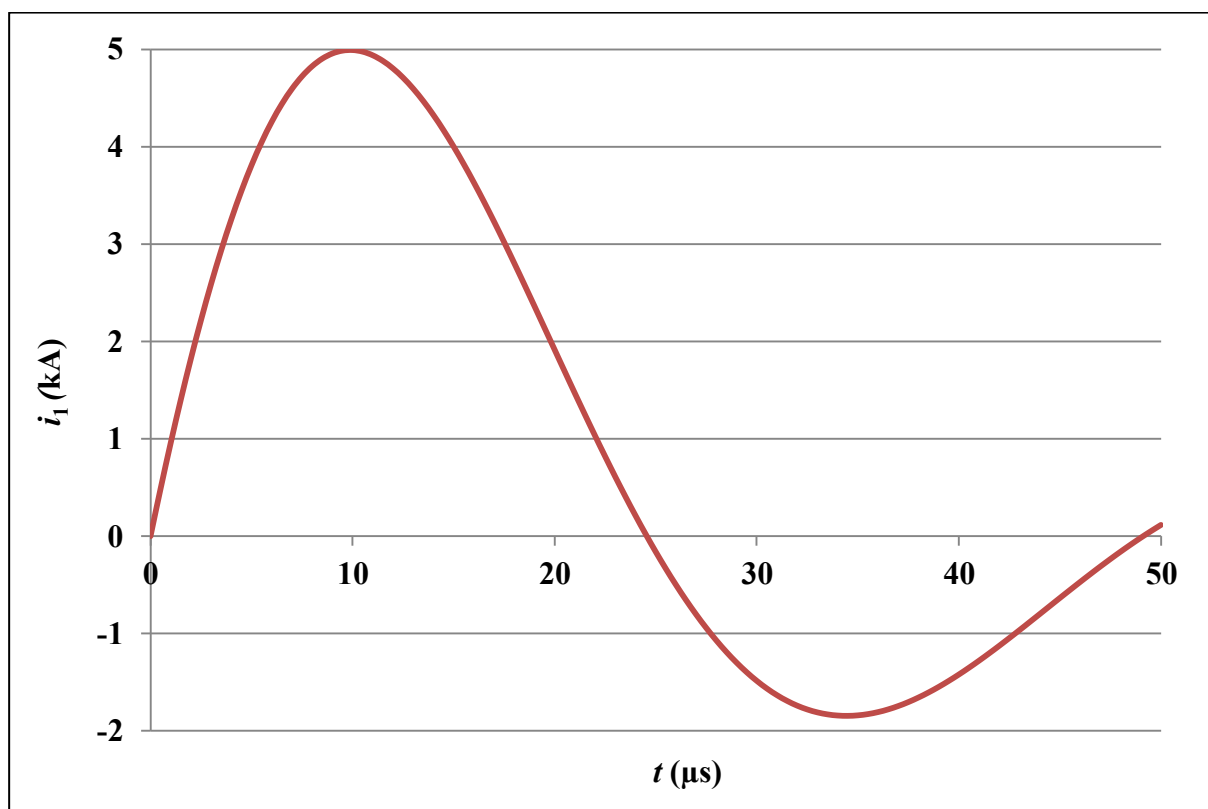
$$I_{m2} = \frac{-U_0}{\sqrt{\frac{L_g}{C_g}}} \cdot \exp\left[-\frac{\arctg(\sqrt{d^2-1})+\pi}{\sqrt{d^2-1}}\right] = \frac{-37 \cdot 10^3}{\sqrt{\frac{37 \cdot 10^{-6}}{1,5 \cdot 10^{-6}}}} \cdot \exp\left[-\frac{\arctg(\sqrt{3,31^2-1})+\pi}{\sqrt{3,31^2-1}}\right] \cong -1,85 \text{ kA} \quad (3.5)$$

Průběh proudu určuje rovnice [2]:

$$i_1(t) = \frac{2U_0}{R_g \cdot \sqrt{d^2-1}} \cdot \exp\left(-\frac{R_g}{2L_g} \cdot t\right) \cdot \sin\left(\frac{R_g \sqrt{d^2-1}}{2L_g} \cdot t\right) \quad (3.6)$$



Obr. 3.2 Modelové obvodové schéma generátoru v programu ATP



Obr. 3.3 Průběh impulzní proudové vlny 8 / 20 μs

V programu ATP je namodelováno obvodové schéma a provedena simulace výbojové impulzní vlny, která je na obrázku 3.3. Její průběh je dán součinem exponenciálního průběhu s průběhem harmonickým. Vzniká průběh harmonický tlumený, který charakterizuje periodický průběh impulzního proudu. Pro dosažení proudového impulzu tvaru 8 / 20 μs velikosti amplitudy 5 kA se použije nabíjené napětí $U_0 = 37$ kV, které je výstupním napětím generátoru.

Hodnoty obvodových prvků RLC generátoru:

$$R_g = 3 \, \Omega, L_g = 37 \, \mu\text{H}, C_g = 1,5 \, \mu\text{F}$$

Maximální impulzní proudová vlna $I_m = 5$ kA

Maximální nabíjené napětí $U_0 = 37$ kV

Konstanty $\alpha = 50240 \, \text{s}^{-1}$, $\beta = 251327 \, \text{s}^{-1}$

Pro výše uvedené obvodové parametry RLC generátoru a impulzního proudu 5 kA tvaru vlny 8 / 20 μs budou navrženy obvodové prvky a výpočet, simulace Rogowského cívky se zakončením do odporu a kondenzátoru.

3.2 Návrh obvodových prvků pro zakončení do kondenzátoru

Vzhledem k tomu, že výstup z Rogowského cívky je úměrný rychlosti změny proudu, má RC integrační člen zásadní význam pro dosažení správného aktuálního tvaru výbojové vlny. Primární časová konstanta týlu vlny $20\text{ }\mu\text{s}$ má být pětkrát rychlejší než časová konstanta integračního RC článku [1] z důvodu vybíjení kondenzátoru. Proto musí být časová konstanta integračního článku $100\text{ }\mu\text{s}$ a vyšší. Čím vyšší hodnota, tím přesnější integrace výstupního signálu z Rogowského cívky. Po převedení do frekvenční oblasti je minimální časová konstanta $100\text{ }\mu\text{s}$ rovna $1,62\text{ kHz}$. To je základní parametr pro stanovení hodnot členů integračního RC článku. Z hodnoty vyplývá, že začátek přenosu by měl být nižší než $1,62\text{ kHz}$. Pro lepší přesnost snímače je určena vyšší časová konstanta integračního členu $300\text{ }\mu\text{s}$ a odpor článku $10\text{ k}\Omega$, z těchto údajů se vypočítá potřebná velikost kondenzátoru:

$$C_c = \frac{\tau}{R_c} = \frac{0,003}{10000} \cong 30\text{ nF} \quad (3.7)$$

Ze známé hodnoty kondenzátoru se vypočítá dolní mezní kmitočet:

$$f_d = \frac{1}{2\pi \cdot R_c C_c} \cong 530\text{ Hz} \quad (3.8)$$

Cílem modelování Rogowského cívky a celého zapojení obvodu je dostat se do oblastí frekvencí přenosů výbojové impulzní vlny a najít přenosovou šířku pásma výbojové vlny, a to znamená odezvu zapojení na periodický signál ve frekvenční oblasti. Tato simulace bude probírána v kapitole 4.2.

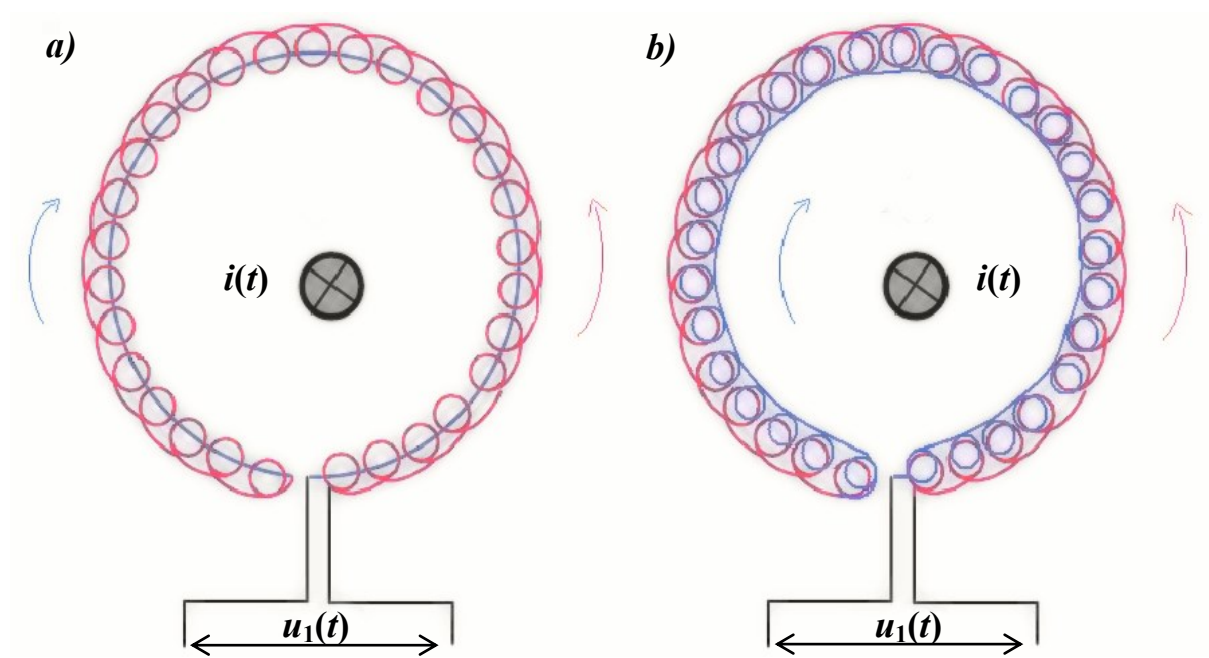
Horní mezní kmitočet senzoru je závislý na indukčnosti a kapacitě vinutí cívky, zvolená hodnota indukčnosti bude $600\text{ }\mu\text{H}$. Horní kmitočet snímače by měl být dvakrát vyšší než kmitočet spádové oblasti přenosu ve frekvenčním pásmu z důvodu odezvy na jednotkový skok měřeného proudu, pak snímač věrohodně zachytí spádovou oblast výbojové vlny ve frekvenčním spektru [1]. Podle výše uvedených hodnot bude navržena cívka, aby horní mezní kmitočet celého zapojení byl vyšší než 80 kHz , což je dvojnásobek minimálního kmitočtu spádové oblasti vlny.

3.3 Návrh obvodových prvků pro zakončení do odporu

Pro návrh zapojení potřebné citlivosti založené na Rogowského cívce je nutné zvolit vhodné parametry této cívky. Ze vztahu 2.10 je zřejmé, že citlivost Rogowského cívky je závislá na několika parametrech, které je nutno správně zvolit pro dosažení žádaných vlastností. Řešení tak není jednoznačné a musí být zohledněny např. konstrukční možnosti cívky, možnost realizace zatěžovacího odporu potřebné velikosti. U navrhovaného senzoru je pro integraci napětí navrženo využití tzv. integrační vlastnosti obvodu. Rogowského cívka bude na výstupu zatížena odporem R_b , a vezmeme-li v úvahu velikost odporu zátěže, který bude mít vliv na integrační podmínky a citlivost měření, nesmí být jeho hodnota příliš velká, protože integrační podmínky není snadné splnit vzhledem k velikosti odporu vinutí cívky. Vysoká citlivost není vhodná pro měření impulzních bleskových proudů, takže výběr hodnoty odporu bočníku by se měl pohybovat kolem $1\text{ }\Omega$. Dolní mezní kmitočet je dán indukčností a odporem vinutí cívky. Zvolená velikost indukčnosti bude 1 mH . Vliv velikosti zatěžujícího odporu je probírán v kapitole 4.2.

4. Návrh Rogowského cívky

Rogowského cívka může být navinutá na prstencové jádro dvojím způsobem. První způsob je navinutí závitů v jednom směru po celé délce cívky. Středem vinutí je vedená zpětná smyčka, která je znázorněna na obrázku 4.1a, tato zpětná smyčka kompenzuje závit pro kolmé magnetické pole a výrazně snižuje vliv rušení při měření. Zpětná smyčka není nutnou podmínkou pro správnou funkci cívky. Druhý způsob navíjení závitů na prstenec cívky je vedení závitů jedním směrem a ve stejném směru zpět, jak je znázorněno na obrázku 4.1b. Cívka se navine tak, aby nevznikl závit pro kolmé magnetické pole.



Obr. 4.1 Způsoby navinutí cívky

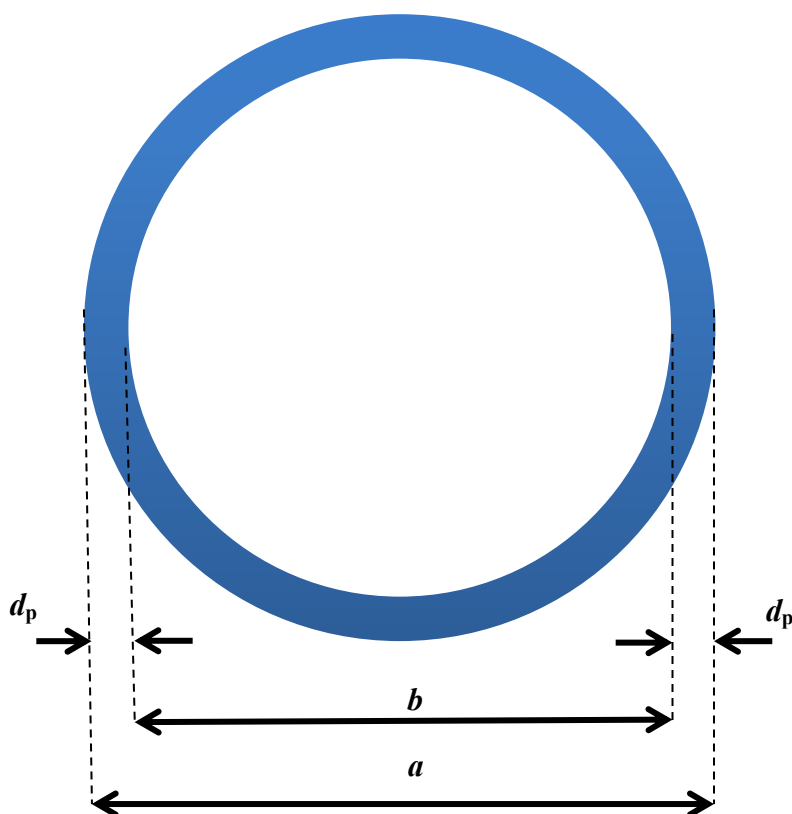
Pro návrh a výpočet Rogowského cívky bude realizováno navíjení závitů na prstenec jedním směrem a ve stejném směru zpět, jak je znázorněno na obrázku 4.1b.

4.1 Návrh Rogowského cívky se zakončením do kondenzátoru

Pro návrh zapojení potřebné citlivosti založené na Rogowského cívce je nutné zvolit určité parametry této cívky, proto Rogowského cívka musí být vzhledem ke své délce relativně štíhlá. Je-li výrazně splněna nerovnost nejlépe o dva řády $d_p \ll D$, (d_p = průměr prstence cívky, D = střední průměr cívky), pak je možné cívku prohlásit za nekonečně tenkou vůči její délce. Kvůli požadované citlivosti snímače však není možné průměr prstence snižovat libovolně, což je patrné z rovnice 2.10.

Pro přenos spádové hrany impulzního proudu ve frekvenční oblasti je nutné znát indukčnost vinutí.

Pro návrh senzoru je zvolen vnější a vnitřní rozměr cívky tak, aby byla dosažena požadovaná indukčnost vinutí 600 μH , což je dobrá hodnota, nižší indukčnost vinutí má za následek vyšší frekvenci přenosu, ale pro měření výbojových proudů stačí nižší frekvence. Zvolené optimální geometrické rozměry cívky jsou popsány na obrázku 4.2. Kvůli parazitní mezivrstvě kapacitě musí být cívka navinuta vodičem s co nejmenším průměrem [1]. Vzhledem k tomu, že Rogowského cívka pracuje v režimu naprázdno a jejím vinutím tedy neprotéká žádný proud, je zvolený smaltovaný vodič s průměrem $d_{cu} = 0,5 \text{ mm}$.



Obr. 4.2 Návrh Rogowského cívky

Legenda obrázku 4.2:

a – vnější rozměr cívky 170 mm

b – vnitřní rozměr cívky 155 mm

d_p – průměr jádra cívky 7,5 mm

Nejdříve je nutné určit střední průměr cívky:

$$D = \frac{a-b}{2} + b = \frac{170-155}{2} + 155 = 162,5 \text{ mm} \quad (4.1)$$

Při znalosti hodnoty středního průměru cívky je její délka:

$$l = \pi \cdot D = \pi \cdot 0,1625 = 0,51 \text{ m} \quad (4.2)$$

Ze známé indukčnosti a geometrických rozměrů se vypočítá počet závitů cívky:

$$L_r = N_r^2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{\pi d^2}{4 \cdot l} \Rightarrow N_r = \sqrt{\frac{L_r}{\mu_0 \cdot \frac{\pi d^2}{4 \cdot l}}} = 2348 \text{ závitů} \quad (4.3)$$

Při průměru vodiče 0,5 mm je počet závitů na jednu vrstvu:

$$N_{r1} = \frac{2\pi \cdot q \cdot \frac{b}{2}}{d_{cu}} = 782 \text{ závitů} \quad (4.4)$$

Počet vrstev vinutí:

$$N_v = \frac{2348}{782} = 3 \quad (4.5)$$

Pro výpočet mezivrstvé kapacity je zvolena tloušťka izolace vodiče $b_t = 22,5 \text{ } \mu\text{m}$, která je z vnější jednovrstvé izolace imido-polyesterového laku. Elektrická pevnost se pohybuje okolo $50 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$, izolační odpor dosahuje hodnoty až $10^{16} \text{ } \Omega$ a relativní permitivita $\epsilon_r = 3,5$. Aby se mohla určit mezivrstvá kapacita, je nutné nejdříve vypočítat mezizávitovou kapacitu ze vzorců 4.6 a 4.7.

$$O^* = \cos^{-1} \cdot \left[1 - \frac{\ln\left(\frac{d_1}{d_2}\right)}{\epsilon_r} \right] = 0,0726 \text{ rad} \quad (4.6)$$

$$K_r = \epsilon_0 \cdot \pi D \cdot \left[\frac{\epsilon_r \cdot O^*}{\ln\left(\frac{d_1}{d_2}\right)} + \cot g\left(\frac{O^*}{2}\right) - \cot g\left(\frac{\pi}{12}\right) \right] = 120 \text{ pF} \quad (4.7)$$

Výsledná mezivrstvá kapacita třívrstvého vinutí cívky:

$$K_{rv3} = \frac{K_r}{2} + \frac{2K_r}{2} = \frac{3K_r}{2} = 180 \text{ pF} \quad (4.8)$$

Vzájemná indukčnost je určující pro velikost výstupního napětí u_2 . Čím nižší vzájemná indukčnost bude, tím bude nižší indukované napětí v cívkce a výstupní napětí. Primární závity N_1 jsou počítány s jedním závitěm, vzájemná indukčnost se určí:

$$M = N_1 \cdot N_2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{\pi d_p^2}{4 \cdot l} = \frac{L_r}{N_2} = \frac{0,0006}{2348} = 255 \text{ nH} \quad (4.9)$$

Pro výpočet odporu vinutí cívky se nejdříve určí délka vodiče:

$$l_{cu} = N_2 \cdot \pi \cdot d_p = 2348 \cdot \pi \cdot 0,0075 \cong 56 \text{ m} \quad (4.10)$$

Ze znalosti délky vodiče je výsledný odpor vinutí cívky:

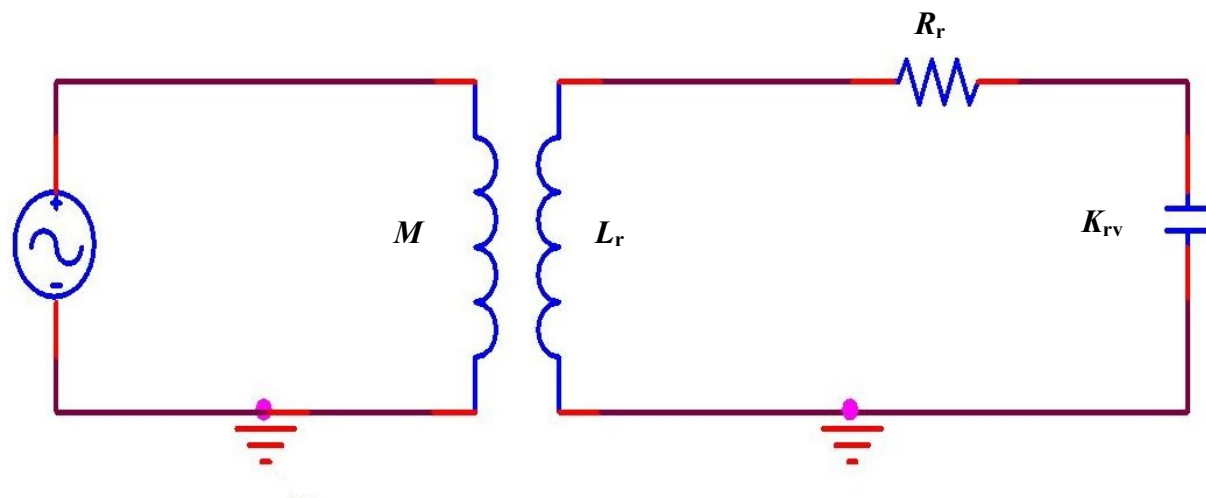
$$R_r = \rho_{cu} \cdot \frac{l_{cu}}{S} = \rho_{cu} \cdot \frac{4 \cdot l_{cu}}{\pi d_{cu}^2} = 1,689 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{4 \cdot 56}{\pi (0,5 \cdot 10^{-3})^2} = 4,76 \Omega \quad (4.11)$$

Vypočítané hodnoty Rogowského cívky jsou shrnuty v tabulce 4.1.

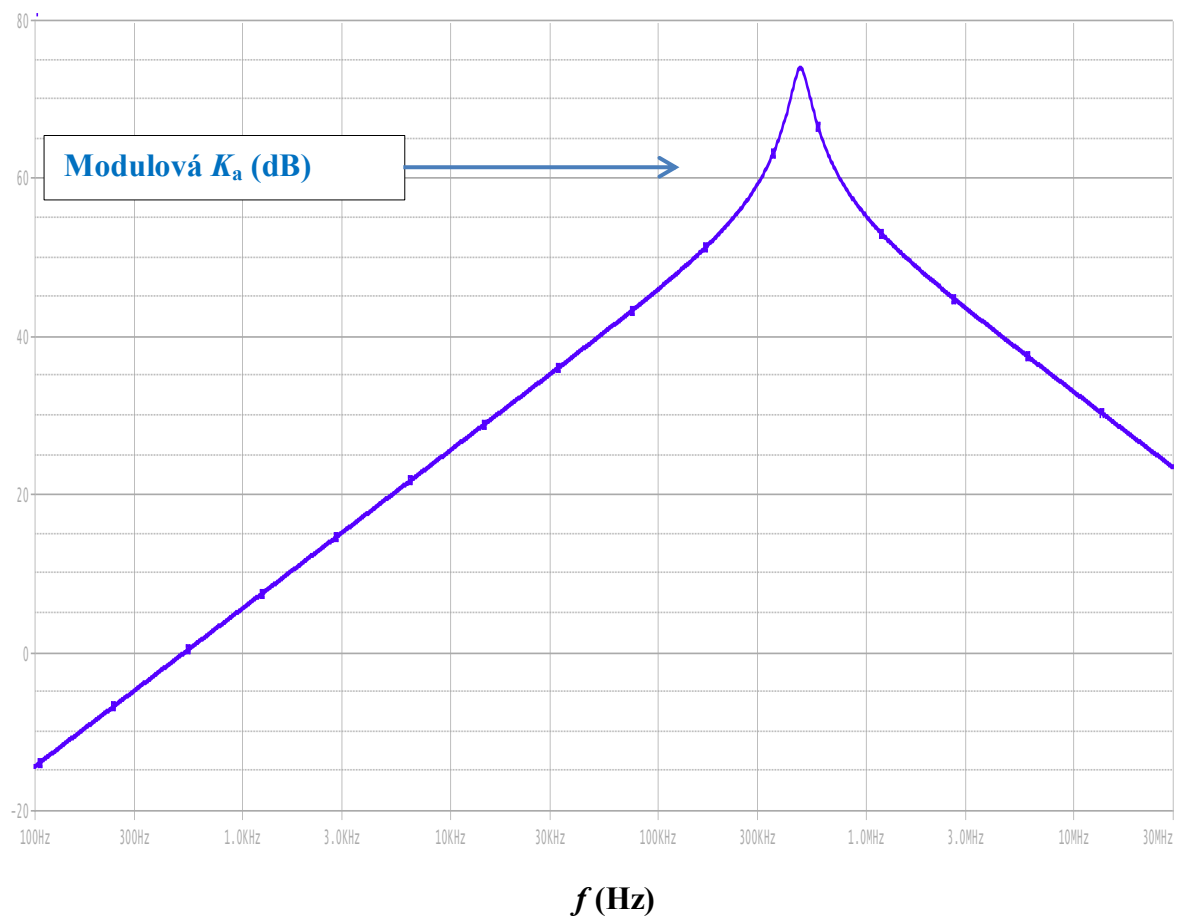
Tabulka 4.1 - Parametry Rogowského cívky

Odpor vinutí - [Ω]	4,76
Indukčnost vinutí - [μH]	600
Vzájemná indukčnost - [nH]	255
Mezivrstvá kapacita vinutí - [pF]	180
Počet závitů	2348
Počet vrstev vinutí	3
Průměr vodiče - [mm]	0,5
Délka vodiče - [m]	56
Relativní permitivita impregnačního laku vodiče	3,5
Vnější rozměr cívky - [mm]	170
Vnitřní rozměr cívky - [mm]	155
Délka cívky - [m]	0,51

Znamé parametry Rogowského cívky se zadají do obvodového schématu, které je na obrázku 4.3 a v programu Pspice se provede AC Sweep/Noise simulace pro vykreslení logaritmické modulové frekvenční charakteristiky. Z obrázku 4.4 je patrné, že cívka nemá ustálený modulový přenos a na konci strmosti přenosu je rezonanční převýšení, z tohoto důvodu je nutné zapojit integrační členek na výstupní svorky cívky.



4.3 Obvodové schéma Rogowského cívky pro simulaci v programu Pspice

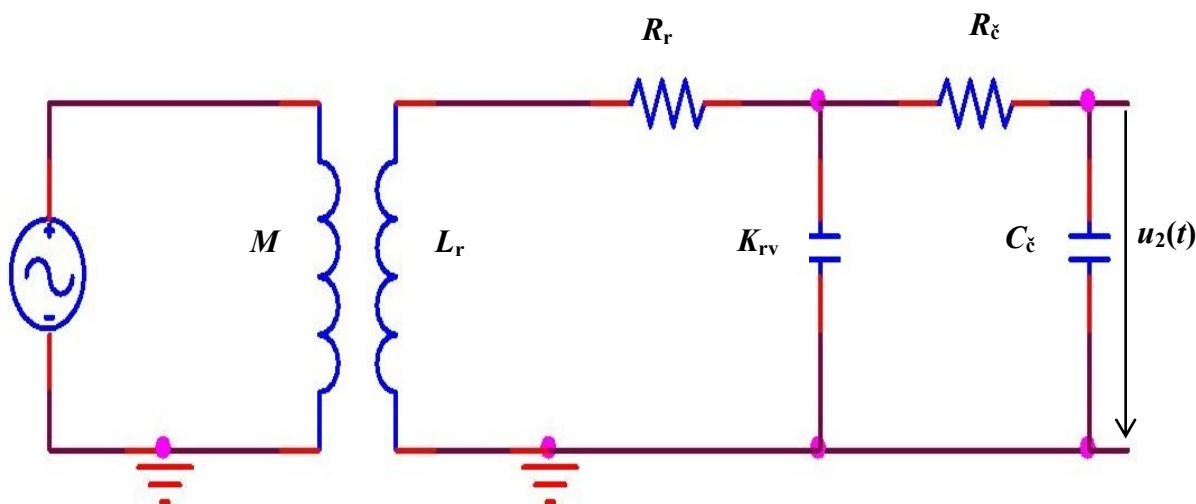


4.4 Logaritmická modulová frekvenční charakteristika Rogowského cívky

4.2 Simulace Rogowského cívky se zakončením do kondenzátoru

4.2.1 Simulace periodickým signálem

V dalším kroku je nutné provést simulaci Rogowského cívky periodickým signálem a posoudit stabilitu obvodu ve frekvenční oblasti po zapojení RC članku do obvodu. Na obrázku 4.5 je nakresleno náhradní obvodové schéma, skládající se ze zdroje, který vytváří periodický signál, vzájemné indukčnosti a Rogowského cívky s integračním RC článkem. V programu Pspice bylo pro simulaci přenosové charakteristiky použito AC Sweep/Noise analýzy od 100 Hz do 30 MHz. Jak je vidět z obrázku 4.5, který vykresluje odezvu systému ve frekvenční oblasti s mezními kmitočty přenosu senzoru, nad nebo pod těmito mezními kmitočty je zapojení nepoužitelné pro měření impulzních proudů. Dále na obrázku jsou zakresleny mezní kmitočty pro šířku pásma přenosu atmosférické proudové vlny. Aby bylo zachováno přesné měření, musí být schopno přenášet pouze průběhy proudu, které se mění v čase minimálně pětkrát rychleji než je doba $\tau_d = 300 \mu s$. Je to způsobeno tím, že se s časovou konstantou τ_d vybíjí kondenzátor C_ξ přes odpor R_ξ , což je podle vztahu 3.7 splněno.



Obr. 4.5 Obvodové schéma Rogowského cívky s RC členem v programu Pspice

Horní mezní kmitočet senzoru je závislý na indukčnosti a kapacitě vinutí cívky, po dosazení známých hodnot lze určit tento kmitočet:

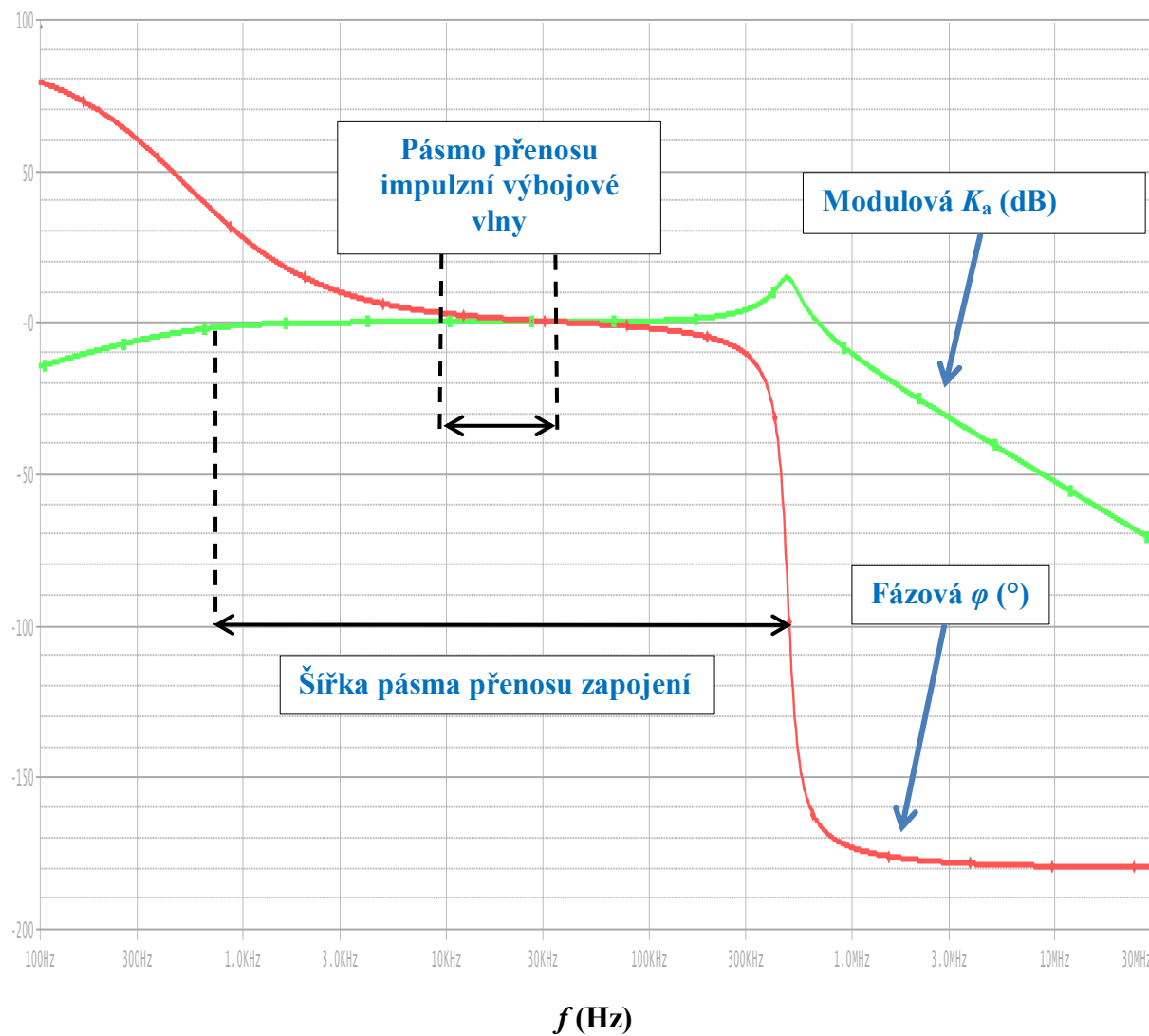
$$f_h = f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r \cdot K_r}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{600 \cdot 10^{-6} \cdot 180 \cdot 10^{-12}}} = 485 \text{ kHz} \quad (4.12)$$

V třetí kapitole byly určeny hodnoty RC članku, tento článek udává dolní mezní kmitočet zapojení:

$$f_d = \frac{1}{2\pi \cdot R_\xi C_\xi} = \frac{1}{2\pi \cdot 10000 \cdot 30 \cdot 10^{-9}} = 530 \text{ Hz} \quad (4.13)$$

Šířka pásma přenosu navrhovaného zapojení:

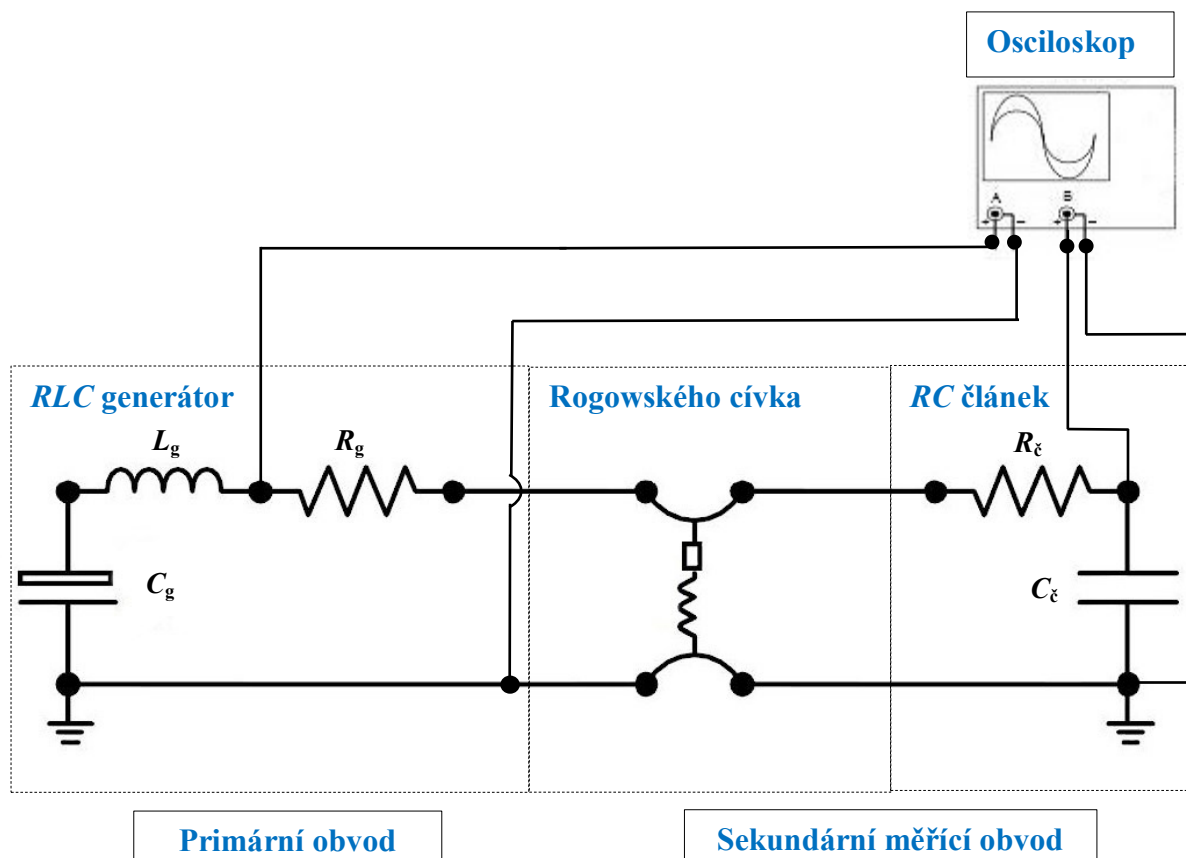
$$B_s = \left(\frac{1}{2\pi\sqrt{L_i \cdot K_{rv}}} \right) - \left(\frac{1}{2\pi \cdot R_c C_c} \right) = f_h - f_d = 485 \cdot 10^3 - 530 = 484,47 \text{ kHz} \quad (4.14)$$



Obr. 4.6 Odezva na periodický signál ve frekvenční oblasti

4.2.2 Simulace atmosférickým impulzním proudem

Obrázek 4.7 popisuje schéma simulace. Na Rogowské cívkě je na její výstupní svorky připojen odpor $R_{\xi} = 10 \text{ k}\Omega$ a kondenzátor $C_{\xi} = 30 \text{ nF}$, přičemž výstupní napětí u_2 je snímáno z kondenzátoru C_{ξ} . Obvod pro měření je složen z generátoru, který vytváří impulzní atmosférický proud $8 / 20 \text{ }\mu\text{s}$, vzájemné indukčnosti a Rogowské cívkou s RC členem. Simulace je snímána dvěma sondami, které jsou připojené k osciloskopu, první na straně impulzního generátoru a druhá na kondenzátoru.



Obr. 4.7 Obvodové schéma simulace v programu ATP

Výsledný odpor zapojení je složený z odporu vinutí cívkou a odporu článku:

$$R_v = R_r + R_{\xi} \cong 10 \text{ k}\Omega \quad (4.15)$$

Kapacita zapojení je paralelní spojení mezivrstvé kapacity cívkou a kapacity kondenzátoru:

$$C_v = K_{rv} + C_{\xi} \cong 30 \text{ nF} \quad (4.16)$$

Velikost výstupního napětí pro proud 1 A lze určit ze vztahu:

$$u_2(t) = \frac{M}{R_v C_v} \cdot i_1(t) = 849 \mu\text{V} \cdot \text{A}^{-1} \quad (4.17)$$

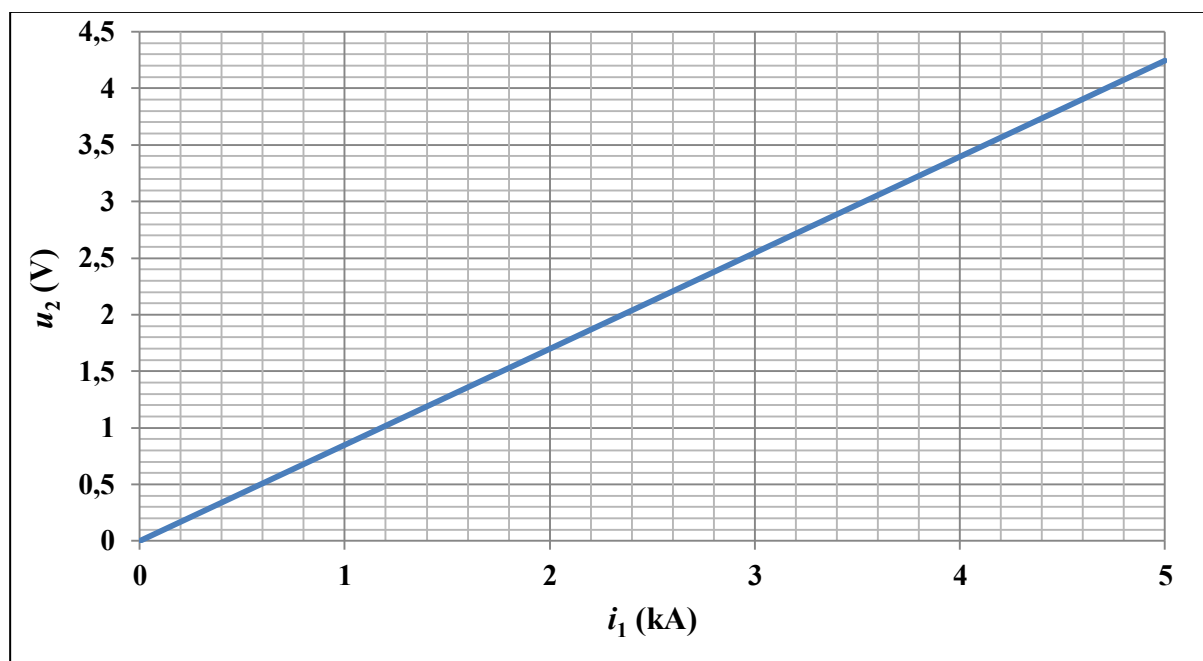
Převodní konstanta celého snímače je podíl primárního proudu k výstupnímu napětí:

$$K_p = \frac{u_2(t)}{i_1(t)} = \frac{0,000849}{1} = 849 \mu\text{V} \cdot \text{A}^{-1} \quad (4.18)$$

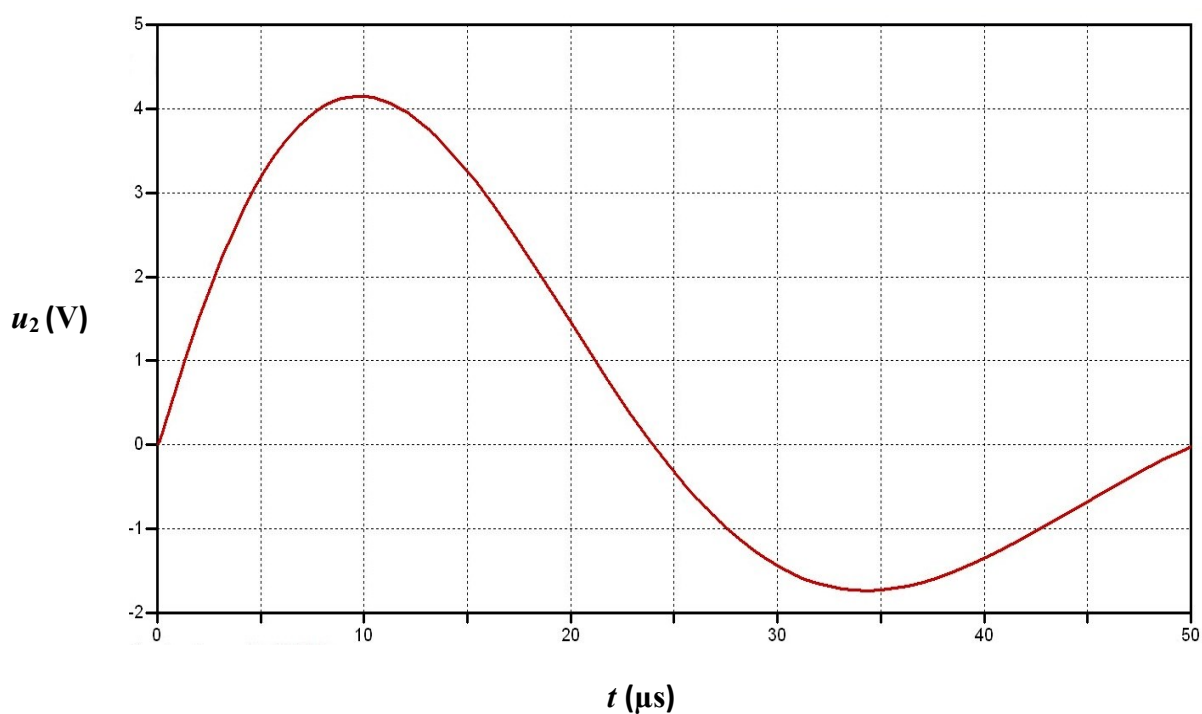
Při měření proudových impulzů generovaných impulzním generátorem bude hodnota výstupního napětí snímače při uvažovaném maximálním proudu $I_m = 5 \text{ kA}$ rovna:

$$u_2(t) = K_p \cdot i_1(t) = 4,25 \text{ V} \quad (4.19)$$

Obrázek 4.8 vykresluje lineární Voltampérovou převodní charakteristiku zapojení.



Obr. 4.8 Převodní charakteristika

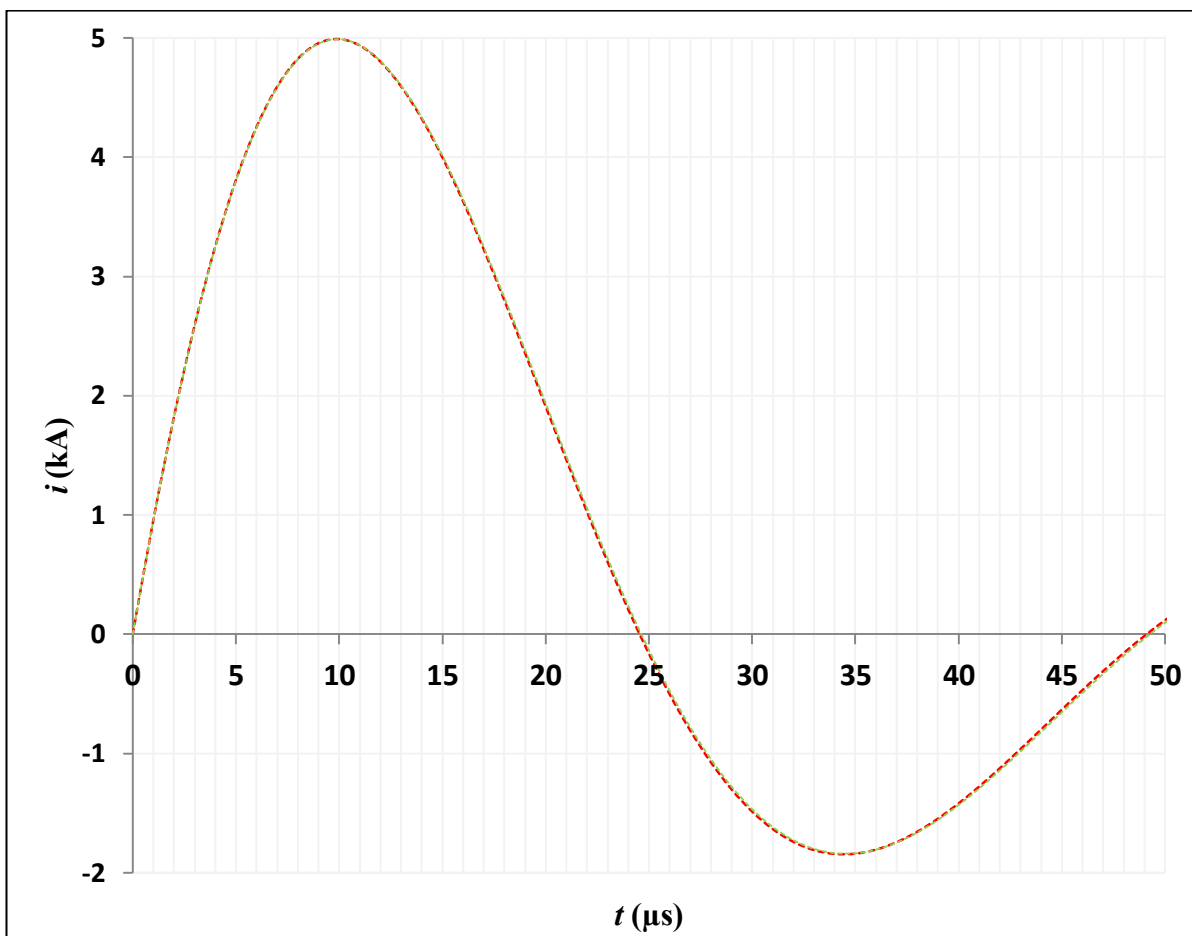


Obr. 4.9 Průběh výstupního napětí u_2

Obrázek 4.9 vykresluje průběh výstupního napětí z výše uvedené simulace. Pro přesné porovnání impulzní proudové vlny vytvořené v RLC generátoru a sekundární simulace je převedeno sekundární výstupní napětí v programu Pspice na primární proud a porovnáno s impulzním proudem vytvořeným v RLC generátoru. Tento srovnávací průběh proudů je zobrazen na obrázku 4.10. Z obrázku je patrné, že senzor přesně kopíruje náběžnou hranu a maximální hranu impulzu s takřka na hranici vnímání chyby. V týlu vlny je nepatrná chyba, která je způsobena pasivním integračním článkem, jenž má právě vliv na spádovou oblast výbojové vlny. Daný průběh měřeného proudu je v mezích přípustných tolerancí pro atmosférický proudový impulz. Tolerance přípustné odchylky je $\pm 10 \%$ pro dobu čela a půltýlu výbojového proudu. Výsledky porovnání jsou shrnuty v tabulce 4.2. Navrhované zapojení je vhodné pro měření impulzních výbojových proudů tvaru vlny $8/20 \mu s$.

Tabulka 4.2 – Srovnání simulovaných parametrů impulzní proudové vlny

	$T_1-8 \mu s$	$T_2-20 \mu s$	I – maximální
Primární hodnoty	4,825 kA ($\delta=0 \%$)	1,910 kA ($\delta=0 \%$)	4,990 kA ($\delta=0 \%$)
Sekundární hodnoty	4,82 kA ($\delta=-0,001 \%$)	1,929 kA ($\delta=+1 \%$)	4,989 kA ($\delta=-0,001 \%$)



Obr. 4.10 Průběh impulzních proudů

Legenda obrázku 4.10:

Zelený průběh – sekundární převedený impulzní proud

Červený průběh – primární impulzní proud

4.2.3 Souhrn vlastností Rogowského cívky se zakončením do kondenzátoru

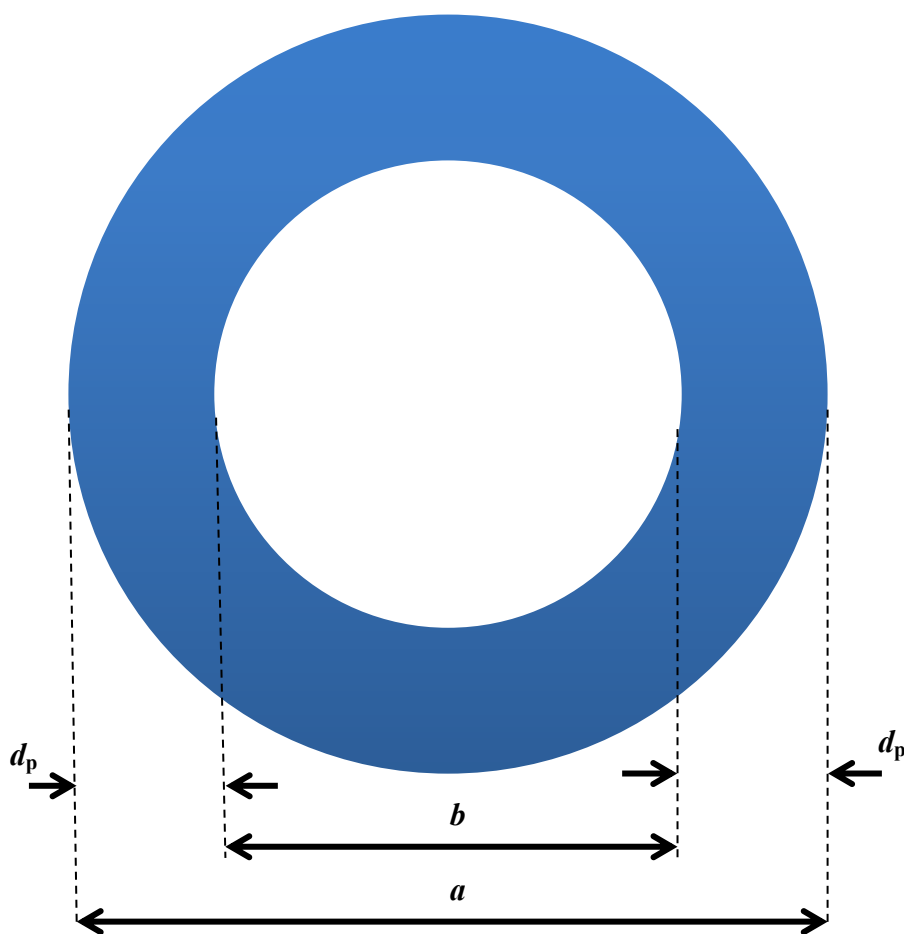
V tabulce 4.3 jsou přehledně shrnuty výsledky výpočtů a simulací Rogowského cívky.

Tabulka 4.3 – Výsledky návrhu Rogowského cívky

Geometrické rozměry	
Vnější rozměr cívky - (mm)	170
Vnitřní rozměr cívky - (mm)	155
Délka cívky - (m)	0,51
Obvodové parametry	
Odpor vinutí - (Ω)	4,76
Indukčnost vinutí - (μH)	600
Vzájemná indukčnost - (nH)	255
Mezivrstvá kapacita vinutí - (pF)	180
Vinutí	
Počet závitů	2348
Počet vrstev vinutí	3
Průměr vodiče - (mm)	0,5
Délka vodiče - (m)	56
Relativní permitivita vodiče	3,5
RC člunek	
Kondenzátor - (nF)	30
Odpor - ($k\Omega$)	10
Mezní kmitočty přenosu zapojení	
Dolní kmitočet - (kHz)	0,53
Horní kmitočet - (kHz)	485
Převodní konstanta pro měřený impulzní proud	
Impulzní proud (kA)	Výstupní napětí (V)
1	0,85
2	1,7
3	2,55
4	3,4
5	4,25

4.3 Návrh Rogowského cívky se zakončením do odporu

Pro návrh snímače se zakončením do odporu se vychází z toho, aby byla indukčnost vinutí vyšší velikosti než se zakončením do kondenzátoru. I vzájemná indukčnost by měla být vyšší hodnoty, toho lze docílit pomocí změny geometrických rozměrů cívky a průřezem vodiče. Čím vyšší je rozdíl cívky mezi vnitřním a vnějším rozměrem prstence, tím bude vyšší indukčnost cívky. V tomto zakončení Rogowského cívky do odporu je nutné zachovat nižší velikost výsledné kapacity vinutí, lze toho docílit malým počtem závitů cívky.



Obr. 4.11 Rozměrový náčrtek Rogowského cívky

Pro výpočet zvolené rozměry cívky:

a – 100 mm

b – 50 mm

d_p – 25 mm

Pro návrh senzoru je zvolen vnější a vnitřní rozměr cívky, aby byla dosažena požadovaná indukčnost vinutí 1 mH, geometrické rozměry cívky jsou na obrázku 4.11. Vzhledem k tomu, že Rogowského cívka pracuje v režimu nakrátko a jejím vinutím protéká proud, je zvolen smaltovaný vodič s průměrem $d_{cu} = 1$ mm.

Nejdříve je nutné určit střední průměr cívky:

$$D = \frac{a-b}{2} + b = \frac{100-50}{2} + 50 = 75 \text{ mm} \quad (4.20)$$

Při známé hodnotě středního průměru cívky je její délka:

$$l = \pi \cdot D = \pi \cdot 0,075 = 0,24 \text{ m} \quad (4.21)$$

Ze zadané indukčnosti a známé délky cívky se vypočítají závity cívky:

$$N_r = \sqrt{\frac{L_r}{\mu_0 \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot l}} = \sqrt{\frac{0,001}{\mu_0 \cdot \frac{\pi \cdot 0,025^2}{4} \cdot 0,24}} = 618 \text{ závitů} \quad (4.22)$$

Při průměru vodiče 1 mm je počet závitů na jednu vrstvu:

$$N_{r1} = \frac{2\pi \cdot q \cdot \frac{b}{2}}{d_{cu}} = 154 \text{ závitů} \quad (4.23)$$

Počet vrstev vinutí:

$$N_v = \frac{618}{154} = 4 \quad (4.24)$$

Vzájemná indukčnost cívky by měla být co nejvyšší, což je patrné ze vzorce 2.36, aby výstupní napětí u_2 bylo co nejnižší. Primární závity N_1 jsou počítány s jedním závitěm, vzájemnou indukčnost lze vyjádřit:

$$M = N_1 \cdot N_2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{\pi d_r^2}{4 \cdot l} = \frac{L_r}{N_2} = \frac{0,001}{618} = 1,6 \mu\text{H} \quad (4.25)$$

Pro výpočet mezivrstvé kapacity je zvolena shodně jako v návrhu cívky v zapojení do kondenzátoru tloušťka izolace vodiče $b_t = 22,5 \mu\text{m}$, která je z vnější jednovrstvé izolace imido-polyesterového laku. Elektrická pevnost se pohybuje okolo $50 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$, izolační odpor dosahuje hodnoty až $10^{16} \Omega$.

Relativní permitivita vodiče má hodnotu $\varepsilon_r = 3,5$. Aby se mohla určit mezivrstvá kapacita, je nutné nejdříve vypočítat mezizávitovou kapacitu ze vzorců 4.26 a 4.27.

$$O^* = \cos^{-1} \cdot \left[1 - \frac{\ln\left(\frac{d_1}{d_2}\right)}{\varepsilon_r} \right] = 0,16 \text{ rad} \quad (4.26)$$

$$K_r = \varepsilon_0 \cdot \pi D \cdot \left[\frac{\varepsilon_r \cdot O^*}{\ln\left(\frac{d_1}{d_2}\right)} + \cotg\left(\frac{O^*}{2}\right) - \cotg\left(\frac{\pi}{12}\right) \right] = 44,23 \text{ pF} \quad (4.27)$$

Výsledná mezivrstvá kapacita čtyřvrstvého vinutí cívky:

$$K_{rv4} = \frac{K_r \cdot K_{rv2}}{2K_{rv2} + K_r} + K_r = \frac{7}{5} K_r = 61,92 \text{ pF} \quad (4.28)$$

Pro výpočet odporu vinutí cívky je nutné nejdříve určit délku vodiče:

$$l_{cu} = N_2 \cdot \pi \cdot d_p = 618 \cdot \pi \cdot 0,025 \cong 48,5 \text{ m} \quad (4.29)$$

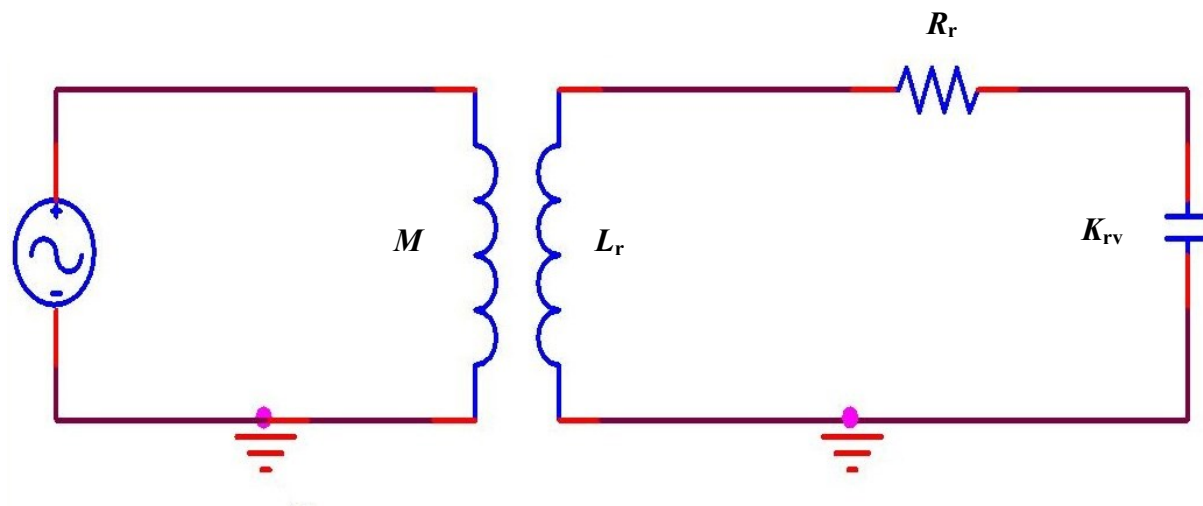
Ze znalosti délky vodiče je určen celkový odpor vinutí cívky:

$$R_r = \rho_{cu} \cdot \frac{l_{cu}}{S} = \rho_{cu} \frac{4 \cdot l_{cu}}{\pi d_{cu}^2} = 1,689 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{4 \cdot 48,5}{\pi (1 \cdot 10^{-3})^2} = 1,04 \Omega \quad (4.30)$$

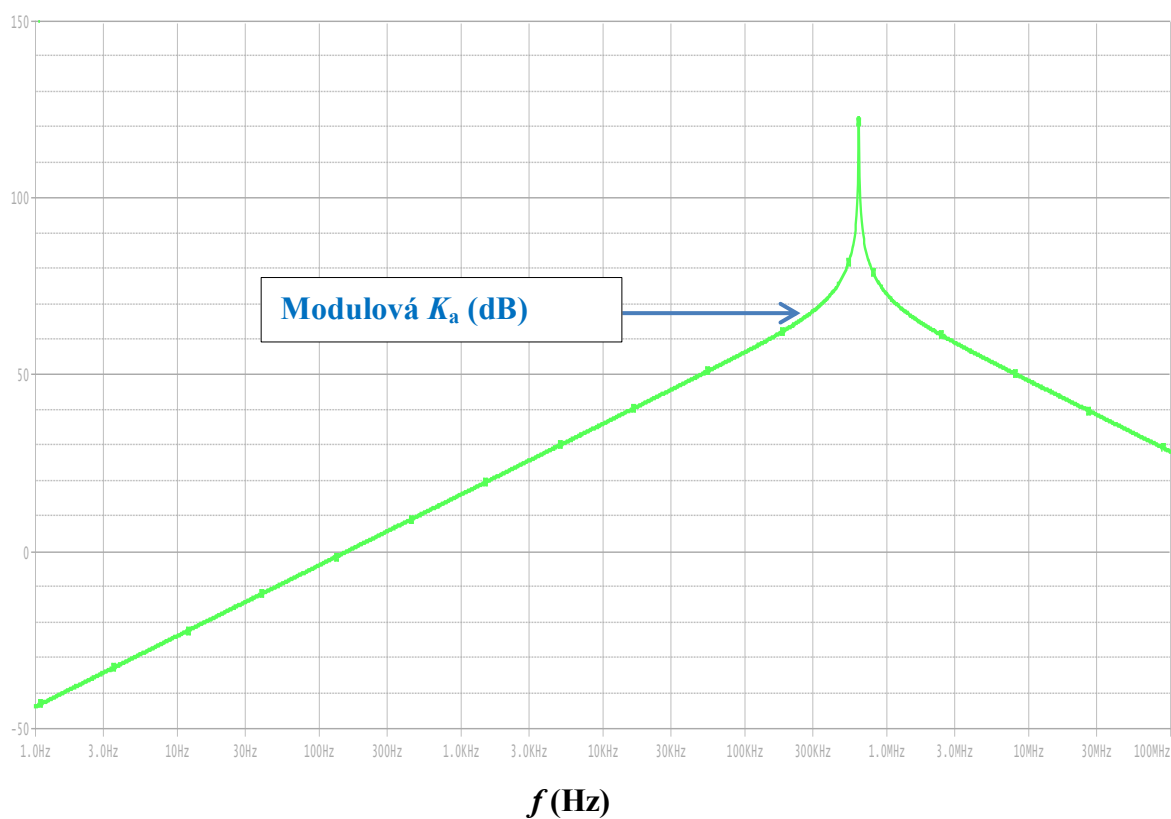
Tabulka 4.4 – Shrnutí parametrů Rogowského cívky

Odpor vinutí – [Ω]	1,04
Indukčnost vinutí - [mH]	1
Vzájemná indukčnost – [μ H]	1,6
Mezivrstvá kapacita vinutí – [pF]	61,92
Počet závitů	618
Počet vrstev vinutí	4
Průměr vodiče - [mm]	1
Délka vodiče - [m]	48,5
Relativní permitivita impregnačního laku vodiče	3,5
Vnější rozměr cívky – [mm]	100
Vnitřní rozměr cívky – [mm]	50
Délka cívky - [m]	0,24

Zadáním vypočítaných hodnot do obvodového schématu je v programu Pspice vykreslena modulová charakteristika Rogowského cívky, z obrázku 4.13 je patrné, že cívka nemá ustálený modulový přenos a navíc je i charakteristické rezonanční převýšení. Proto je nutné využít integrační vlastnosti obvodu.



4.12 Obvodové schéma Rogowského cívky pro simulaci v programu Pspice

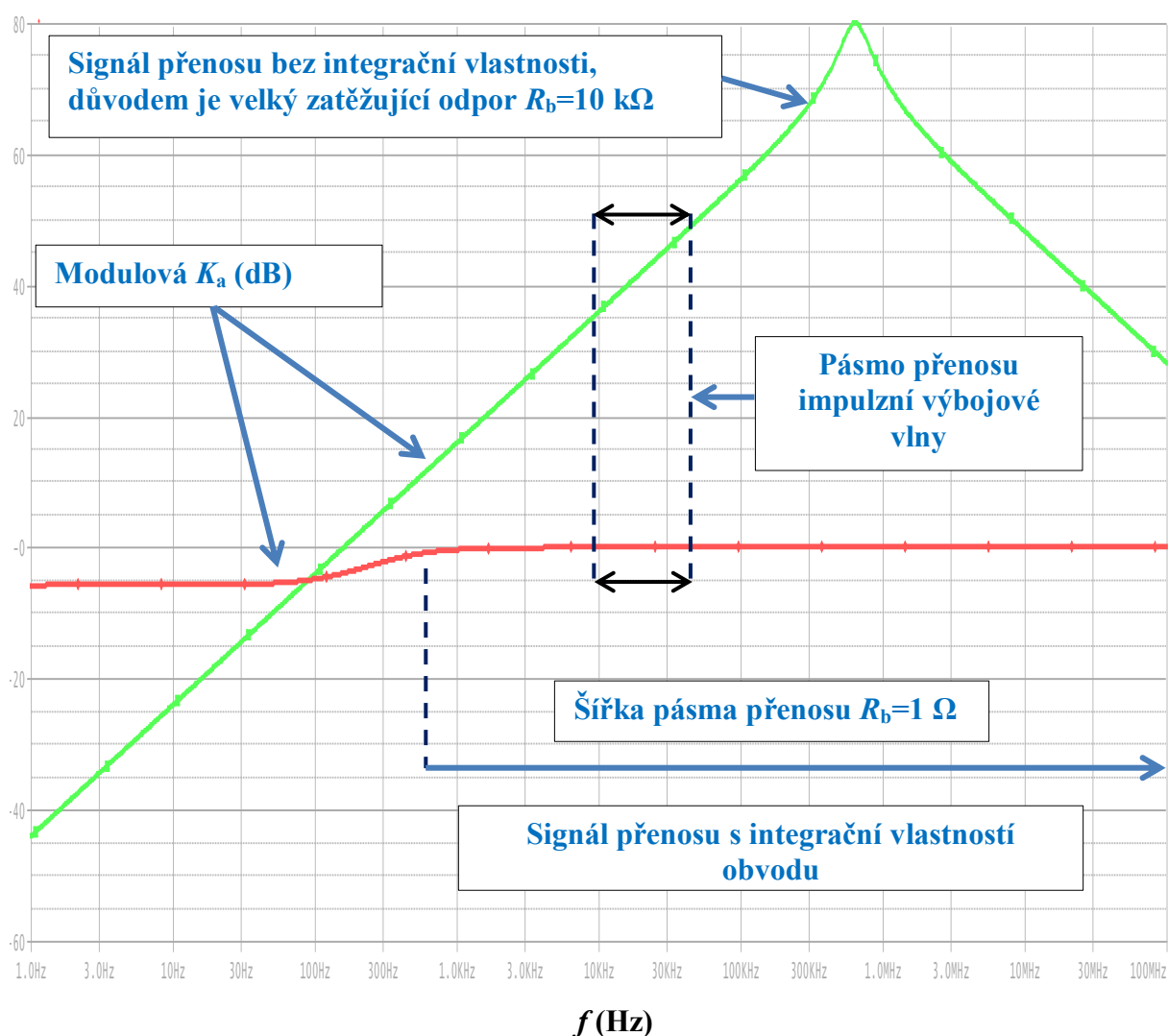


4.13 Logaritmičká modulová charakteristika Rogowského cívky

4.4 Simulace Rogowského cívky se zakončením do odporu

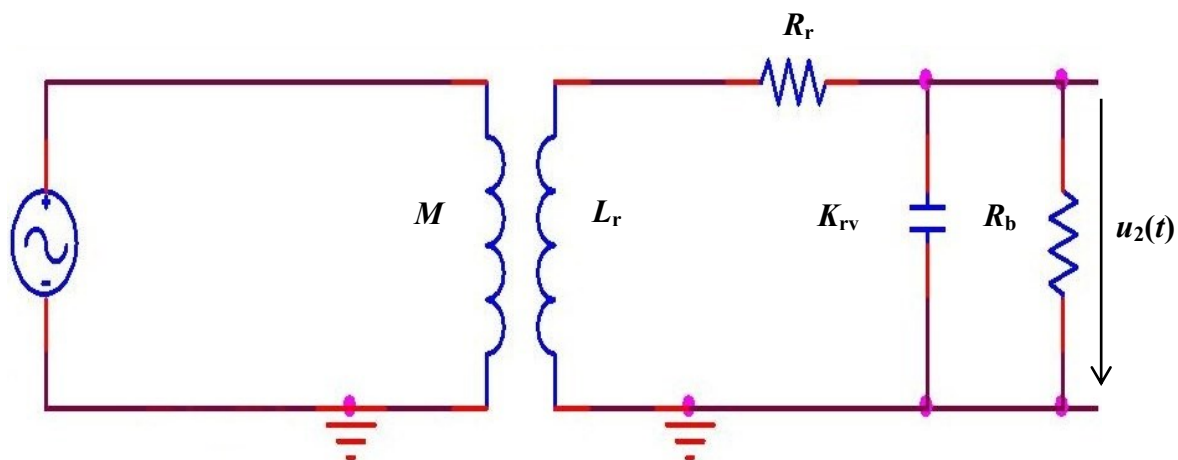
4.4.1 Simulace periodickým signálem

V dalším kroku je potřebné zjistit stabilitu celého systému po zapojení zatěžujícího odporu a vzájemné indukčnosti. Zjištěné hodnoty parametrů prvků náhradního schématu snímače na obr. 4.15 byly použity při simulaci kmitočtové charakteristiky přenosu v závislosti na velikosti zatěžovacího odporu bočníku v programu Pspice. Z výsledků simulace na obrázku 4.14 je zřejmé, že při zatížení snímače hodnotami odporu vyšších než $1\ \Omega$, není na rezonančním kmitočtu dostatečně ztlumeno rezonanční převýšení. Dále chybí senzoru ustálený amplitudový přenos, protože není využito integrační vlastnosti obvodu, jak je tomu u zatěžujícího odporu $1\ \Omega$. Rogowského cívka s odporem bočníku $R_b=10\ \text{k}\Omega$ není vhodná pro měření výbojových proudů.



Obr. 4.14 Odezva Rogowského cívky na modulový přenos ve frekvenční oblasti pro různé zatěžující odpory

Simulace Rogowského cívky periodickým signálem se zatěžujícím odporem 1 Ω



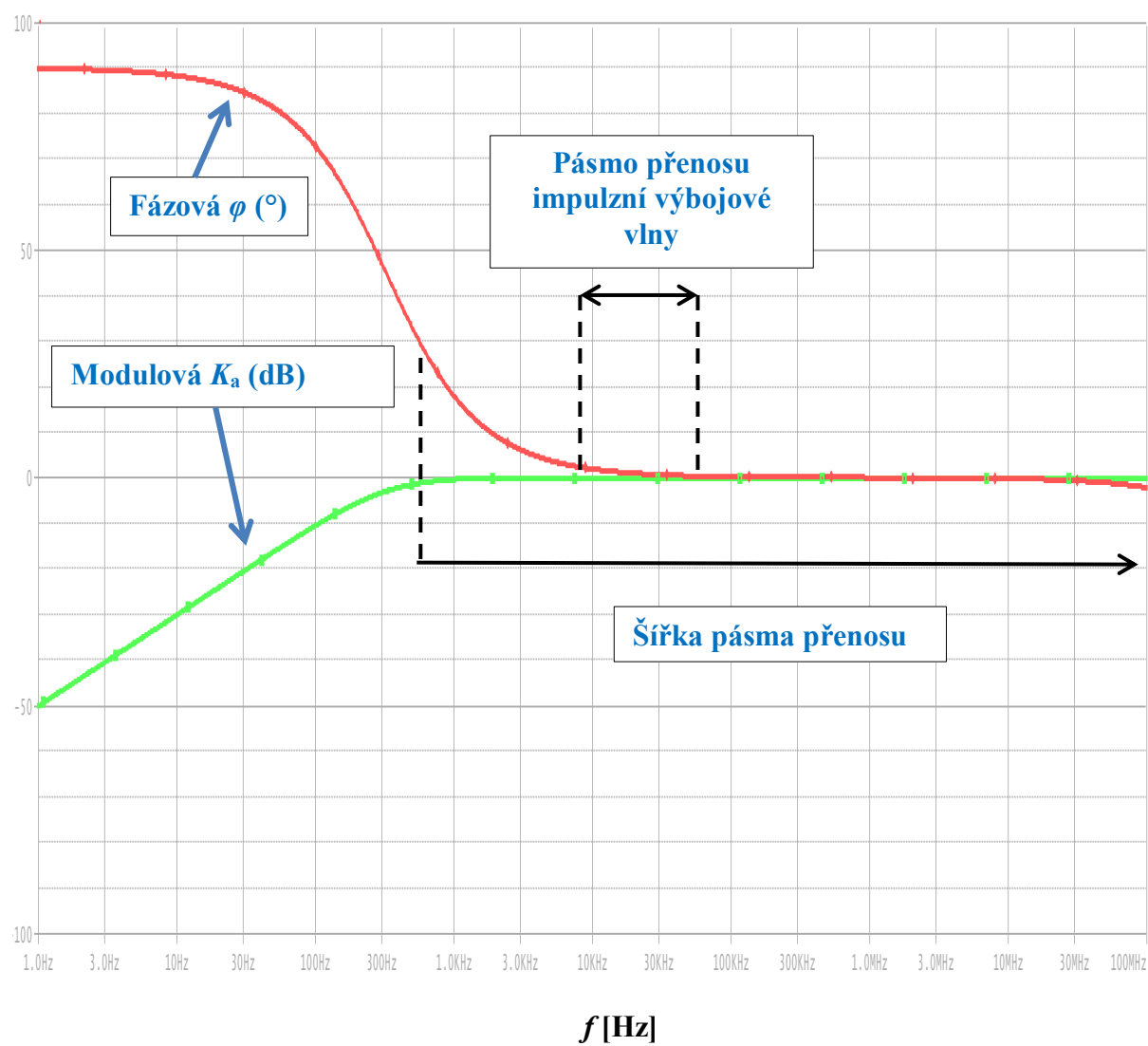
Obr. 4.15 Obvodové schéma Rogowského cívky s odporem

Dolní mezní kmitočet snímače se skládá z indukčnosti a odporu vinutí i zatěžujícího odporu, lze jej určit ze vztahu:

$$f_d = \frac{R_b + R_r}{2\pi L_r} = \frac{R_v}{2\pi L_r} = \frac{2,04}{2\pi \cdot 0,001} = 320 \text{ Hz} \quad (4.31)$$

Na obrázku 4.15 je nakresleno náhradní obvodové schéma. Je složeno ze zdroje, který vytváří periodický signál, dále ze vzájemné indukčnosti a Rogowského cívky se zatěžujícím odporem.

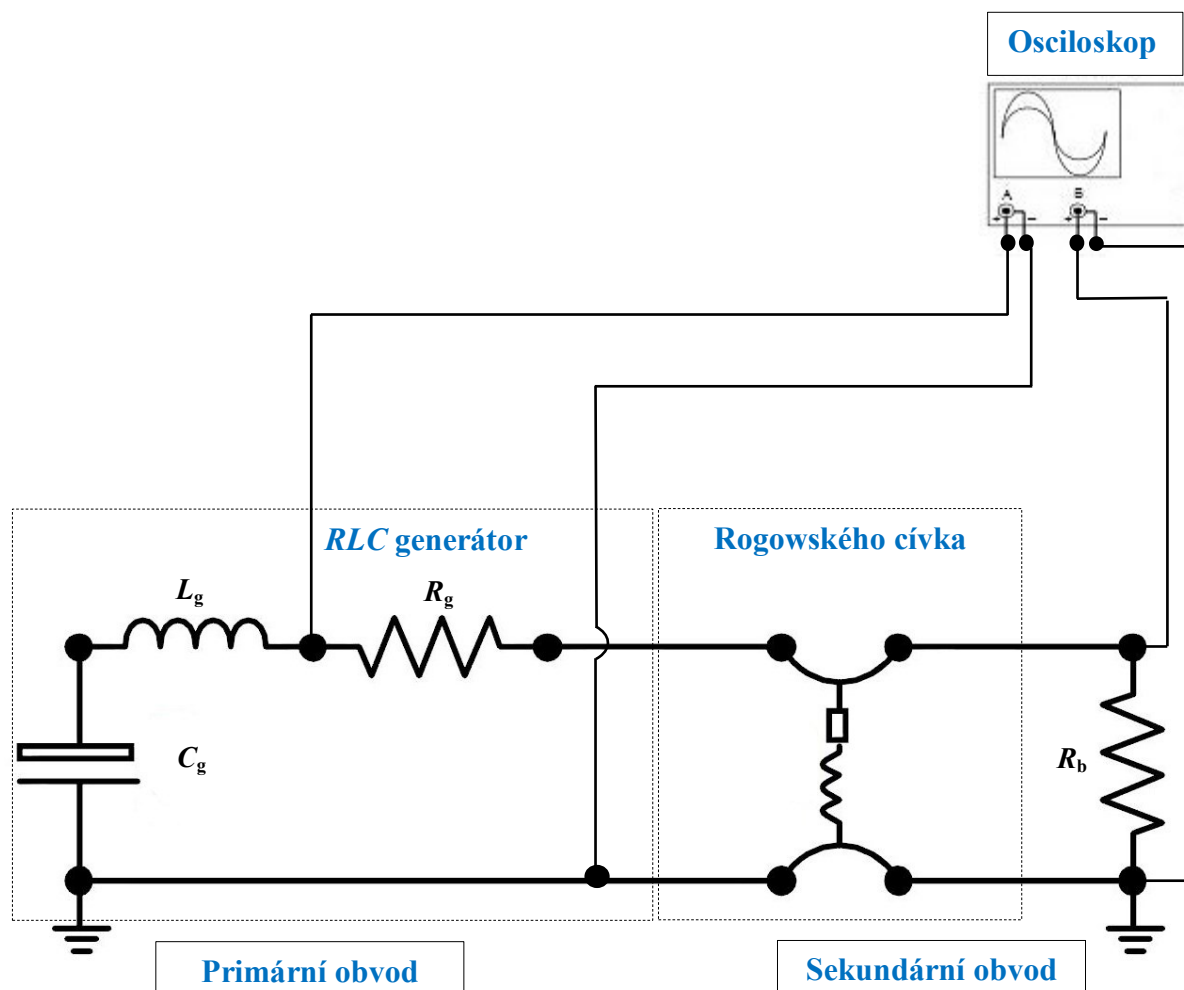
V programu Pspice bylo pro simulaci přenosové charakteristiky použito AC Sweep/Noise analýzy od 1 Hz do 100 MHz. Jak je vidět z obrázku 4.16, který vykresluje odezvu systému ve frekvenční oblasti s mezním dolním kmitočtem přenosu zapojení, ztrácí obvod pod tímto mezním kmitočtem integrační vlastnosti. Dále jsou na obrázku zakresleny mezní kmitočty pro šířku pásma přenosu atmosférické proudové vlny. V tomto zapojení je závislý přenos ve frekvenční oblasti na vhodně zvolených geometrických rozměrech cívky a nízkém zatěžujícím odporu. Šířka pásma navrhovaného zapojení začíná frekvencí 320 Hz a končí až teoreticky v nekonečno za předpokladu výše uvedeného nízkého zatěžujícího odporu, který nemá induktivní parazitní charakter.



Obr. 4.16 Odezva zapojení na periodický signál ve frekvenční oblasti

4.4.2 Simulace atmosférickým impulzním proudem

Obrázek 4.17 popisuje schéma simulace v programu ATP. Na výstupní svorky Rogowského cívky je připojen odpor $R_b = 1 \Omega$, z něhož je snímán průběh výstupního napětí u_2 . Obvod pro simulaci se skládá z generátoru, který vytváří impulzní atmosférický výbojový proud tvaru vlny 8 / 20 μs , vzájemné indukčnosti, Rogowského cívky a zatěžujícího odporu. Simulace je snímána dvěma sondami, které jsou připojené k osciloskopu, první na straně generátoru, kde je originální signál impulzní vlny, a druhá na zatěžujícím odporu.



Obr. 4.17 Obvodové schéma simulace v programu ATP

Velikost výstupního napětí pro určitý proud 1 A, který se naměří na zatěžujícím odporu:

$$u_2(t) = \frac{M \cdot R_v}{L_r} \cdot i_1(t) = 3,26 \text{ mV} \cdot \text{A}^{-1} \quad (4.32)$$

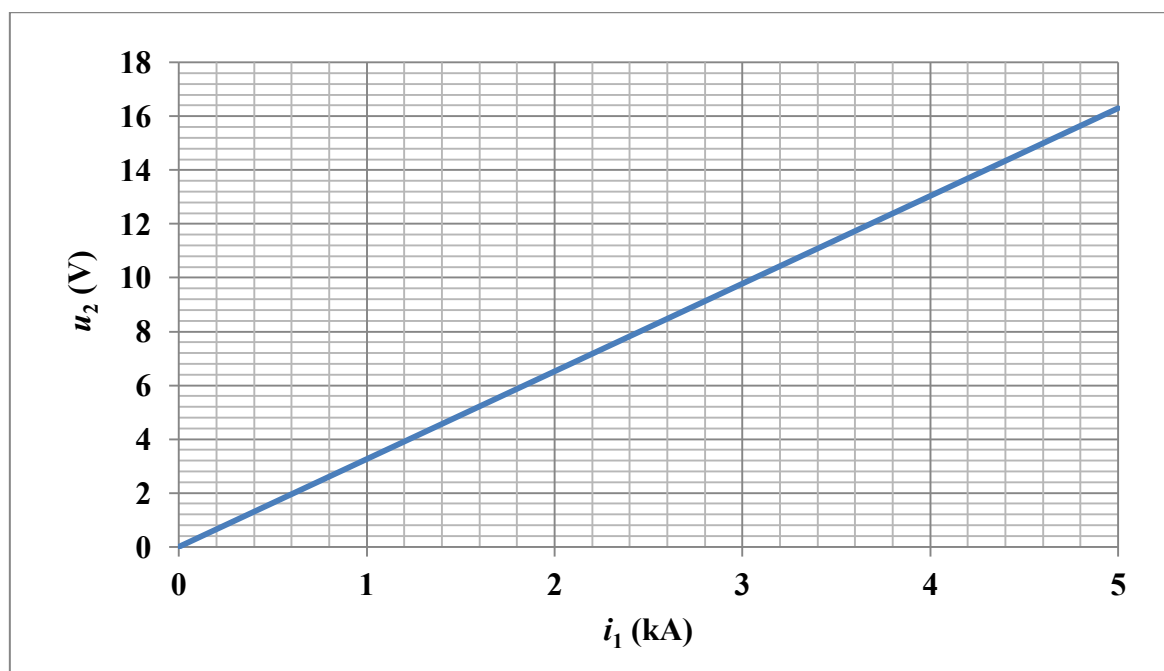
Převodní konstanta celého snímače je podíl primárního proudu k výstupnímu napětí:

$$K_p = \frac{u_2(t)}{i_1(t)} = \frac{0,00326}{1} = 3,26 \text{ mV} \cdot \text{A}^{-1} \quad (4.33)$$

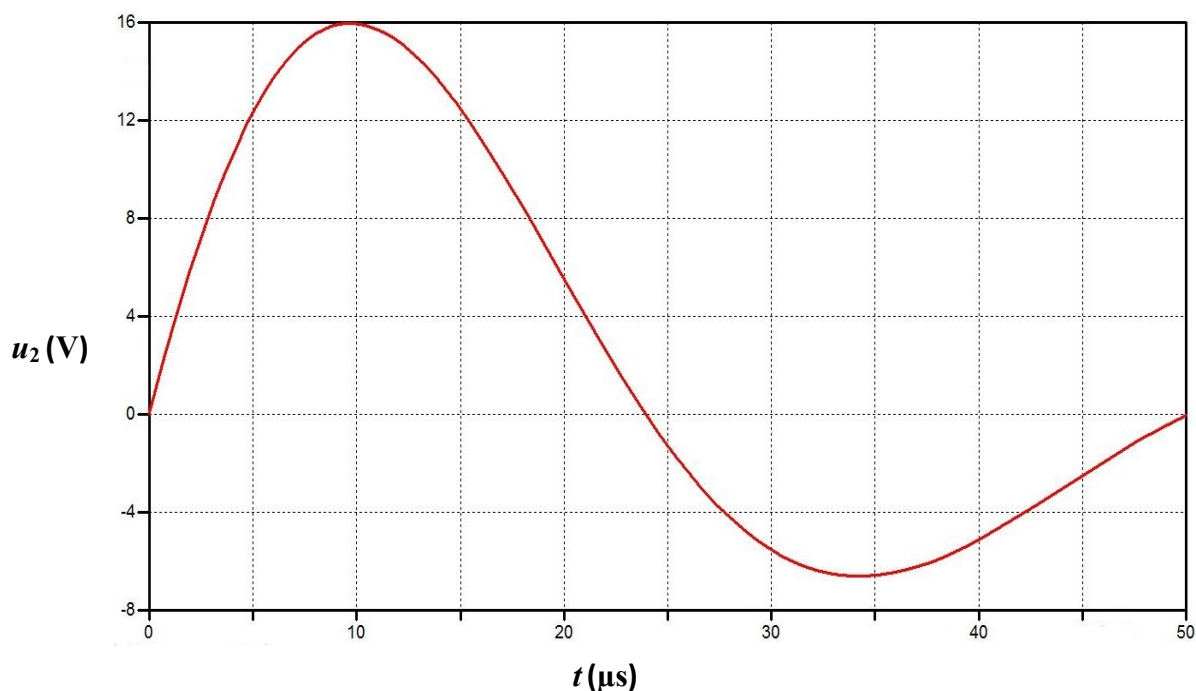
Při měření proudových impulzů generovaných impulzním generátorem bude hodnota výstupního napětí snímače při uvažovaném maximálním proudu $I_m = 5 \text{ kA}$ rovna:

$$u_2(t) = K_p \cdot i_1(t) = 0,00326 \cdot 5000 = 16,3 \text{ V} \quad (4.34)$$

Na obrázku 4.18 je vykreslena lineární Voltampérová převodní charakteristika zapojení.



Obr. 4.18 Převodní charakteristika

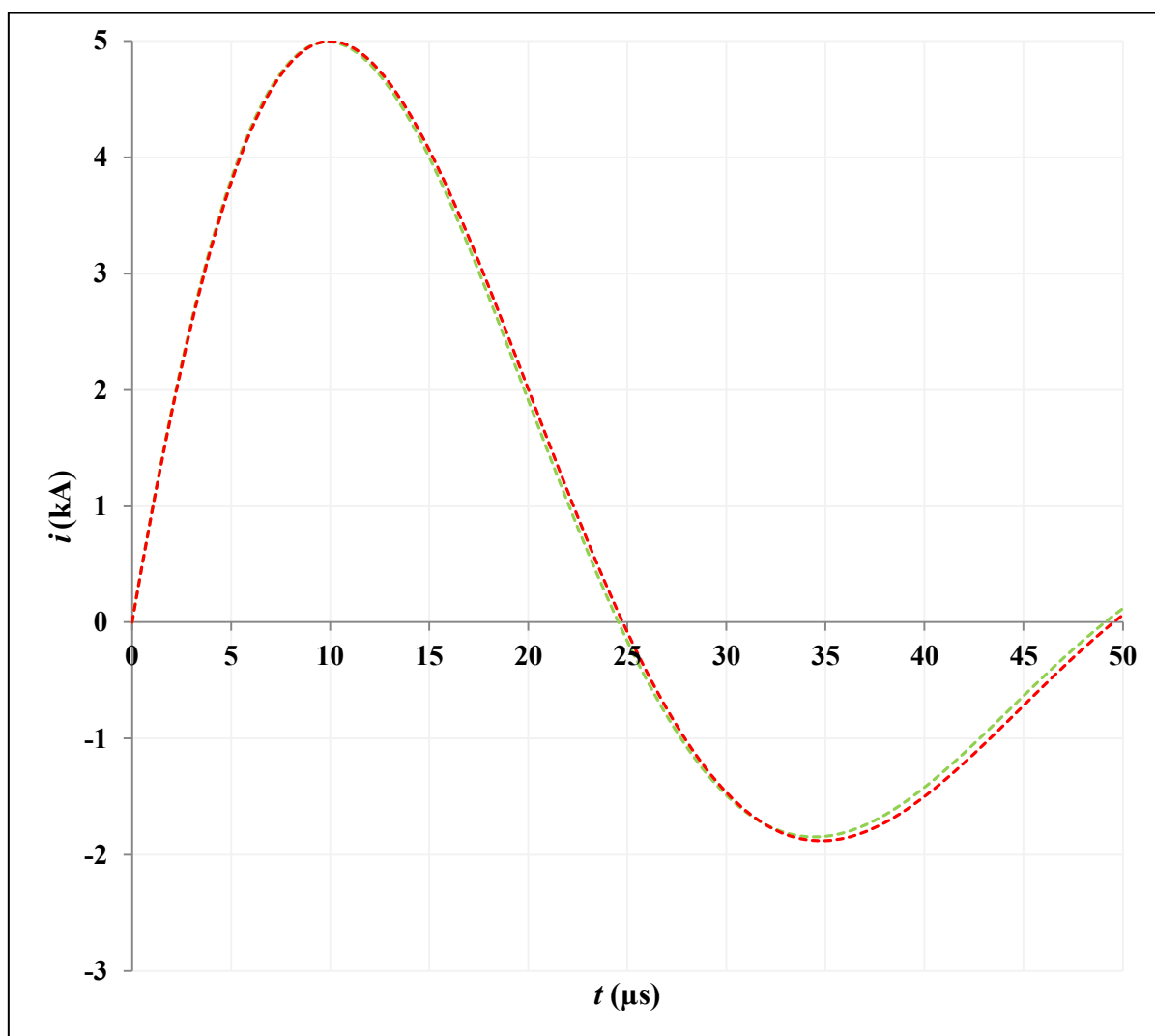


Obr. 4.19 Průběh výstupního napětí u_2

Obrázek 4.19 vykresluje průběh výstupního napětí z výše uvedené simulace. Pro přesné porovnání impulzní proudové vlny vytvořené v RLC generátoru a sekundární simulace je sekundární výstupní napětí převedeno pomocí výpočtu v programu Pspice na primární proud a porovnáno s impulzním proudem vytvořeným v RLC generátoru. Tento srovnávací průběh proudů je zobrazen na obrázku 4.20. Z obrázku je patrné, že snímač přesně kopíruje náběžnou hranu a maximální hranu impulsu s takřka na hranici posouzení chyby. V týlu vlny je 4 % chyba, která je způsobena pasivní integrační vlastností obvodu, jenž má právě vliv na spádovou oblast výbojové vlny. Daný průběh měřeného proudu je v mezích přípustných tolerancí pro atmosférický proudový impuls. Tolerance přípustné odchylky je $\pm 10 \%$ pro dobu čela a půltýlu výbojového proudu. Výsledky porovnání jsou uvedeny v tabulce 4.5. Navrhované zapojení je vhodné pro měření impulzních výbojových proudů tvaru vlny $8/20 \mu s$.

Tabulka 4.5 – Srovnání simulovaných parametrů impulzní proudové vlny

	$T_1-8 \mu s$	$T_2-20 \mu s$	I – maximální
Primární hodnoty	4,825 kA ($\delta=0 \%$)	1,910 kA ($\delta=0 \%$)	4,990 kA ($\delta=0 \%$)
Sekundární hodnoty	4,811 kA ($\delta=-0,22 \%$)	1,986 kA ($\delta=+4 \%$)	4,997 kA ($\delta=+0,02 \%$)



Obr. 4.20 Průběh výstupního napětí u_2

Legenda obrázku 4.20:

Zelený průběh – primární impulzní proud

Červený průběh – sekundární převedený impulzní proud

4.4.3 Souhrn vlastností Rogowského cívky se zakončením do odporu

Tabulka 4.6 popisuje dosažené výsledky výpočtů a simulací Rogowského cívky.

Tabulka 4.6 – Výsledky návrhu Rogowského cívky

Geometrické rozměry	
Vnější rozměr cívky - (mm)	100
Vnitřní rozměr cívky - (mm)	50
Délka cívky - (m)	0,24
Obvodové parametry	
Odpor vinutí - (Ω)	1,04
Indukčnost vinutí - (mH)	1
Vzájemná indukčnost - (μ H)	1,6
Mezivrstvá kapacita vinutí - (pF)	61,92
Vinutí	
Počet závitů	618
Počet vrstev vinutí	4
Průměr vodiče - (mm)	1
Délka vodiče - (m)	48,5
Relativní permitivita vodiče	3,5
Zatěžující odpor	
Odpor - (Ω)	1
Mezní kmitočet přenosu zapojení	
Dolní kmitočet - (kHz)	0,32
Převodní konstanta	
Impulzní proud (kA)	Výstupní napětí (V)
1	3,26
2	6,52
3	9,78
4	13,04
5	16,3

4.5 Zhodnocení návrhů

Celý koncept návrhů vychází z podmínky šířky pásma přenosu výbojové impulzní vlny ve frekvenční oblasti. Vzhledem k tomu, že výstup z Rogowského cívky je úměrný rychlosti změny proudu, má integrační článek zásadní význam pro dosažení správného aktuálního tvaru výbojové vlny. Cílem modelování Rogowského cívky a celého zapojení obvodu je určení hodnot geometrického tvaru cívek a RC článku se zakončením do kondenzátoru, nebo využití integrační vlastnosti obvodu, jak je to možné v zakončení do odporu.

Zakončení do kondenzátoru

Pro stanovení optimálních geometrických rozměrů cívky se v návrhu vychází z podmínky, že střední průměr rozměru cívky je větší o dva řády než průměr jádra prstence cívky. Zvyšováním rozdílů výše uvedených rozměrů se docílí zvýšení indukčnosti vinutí, což není dobrá volba pro zakončení do kondenzátoru. Když se měří výbojové proudy tvaru $8/20 \mu s$, nesmí být indukčnost vinutí příliš vysoké hodnoty, to má za následek nízkou šířku pásma přenosu celého zapojení. Pro měření impulzního proudu, kdy je doba atmosférického děje v mikrosekundách, stačí indukčnost vinutí $600 \mu H$, tomu odpovídá horní frekvence přenosu 485 kHz . Při měření v elektronice, kdy měřené děje trvají v nanosekundách, musí být právě indukčnost co nejnižší, a tím vrchní kmitočet přenosu v MHz . Pro přesné stanovení průběhu měřeného impulzního proudu je důležitá frekvenční závislost RC článku. Ta se s rostoucí frekvencí zvyšuje směrem k rezonanci cívky. Zásadní je, aby frekvenční pásmo přenosu výbojového proudu leželo na vodorovné ose modulového přenosu celého zapojení, které je znázorněno na obrázku 4.6, kdy se minimálně projeví frekvenční závislost RC článku a integrující signál je bez chyby. V případě navrhovaného senzoru s RC článkem byl tento požadavek splněn. Dále je nutné, aby fázový posuv mezi měřeným primárním proudem a sekundárním výstupním napětím v místě přenosu výbojové vlny byl nulový, což je také splněno. Berou-li se v úvahu hodnoty členů RC článku a velikosti výstupního napětí, nelze nekonečně zvyšovat hodnotu odporu článku, protože to má za následek snížení výstupního napětí. Další neopomenutelná věc je citlivost měřicího osciloskopu, který by nereagoval na příliš nízké výstupní napětí z RC článku.

Zakončení do odporu

S tímto zakončením je důležité vhodně zvolit velikost indukčnosti, odporu vinutí a nízký zatěžující odpor pro přesné stanovení průběhu měřeného impulzního proudu. Čím bude vyšší vzájemná indukčnost, tím bude naměřeno vyšší výstupní napětí na zatěžujícím odporu. Zatěžující odpor je zvolený co nejnižší hodnoty, aby vyzkratoval mezivrstvou kapacitu vinutí, a tím má obvod parametry integrujícího článku. V navrhovaném zapojení leží pásmo přenosu výbojové vlny na vodorovném modulovém vykreslení, jak je znázorněno na obrázku 4.16. I v tomto zapojení je fázový posuv měřeného impulzního proudu vůči výstupnímu napětí nulový.

5. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout dvě Rogowského cívky a obvodové prvky k měření výbojových impulzních proudů tvaru vlny $8/20 \mu\text{s}$. Úvodní část práce je proto věnována základnímu principu Rogowského cívky, charakteristice výbojového impulzního proudu v časové oblasti a následnému převedení do frekvenční oblasti a zjištění potřebného pásma přenosu, dále problematice měření Rogowského cívkou s pasivním zakončením do kondenzátoru a odporu.

V druhé části práce jsou vypočítané obvodové parametry impulzního generátoru proudu a v programu ATP nasimulován průběh impulzního proudu. Dále byly určeny hodnoty RC článku tak, aby byla zachována přesnost měření se zakončením do kondenzátoru. V zakončení do odporu byl vybrán zatěžující odpor pro dosažení integrační vlastnosti obvodu.

V poslední části práce byly navrženy dvě Rogowského cívky s pasivním zakončením podle určených parametrů pro měření velkých impulzních proudů tvaru vlny $8/20 \mu\text{s}$ o amplitudě 5 kA . Následně byla provedena analýza snímačů se zakončením do kondenzátoru a odporu ve frekvenčním pásmu přenosu, a to v programu Pspice a v časové oblasti v programu ATP při simulaci výbojové impulzní proudové vlny $8/20 \mu\text{s}$. Z výsledků simulací jsou navrženy Rogowského cívky s pasivním zakončením vhodné pro měření výbojových impulzních proudů tvaru vlny $8/20 \mu\text{s}$.

6. Literatura

1. PATOČKA, Miroslav: *Magnetické jevy a obvody ve výkonové, měřicí a silnoproudé elektrotechnice*. Brno: VUTIUM, 2011. 564 s. ISBN 978-80-214-4003-6
2. MACH, Veleslav: *Technika vysokého napětí*. Ostrava: ES VŠB, 2006. 114 s. ISBN 978-80-214-4003-6
3. MACH, Veleslav: *Cvičení z TVN*. Ostrava: ES VŠB, 1991
4. MAYER, Daniel: *Úvod do teorie elektrických obvodů*. Praha: SNTL, 1981. 688 s.
5. MYSLÍK, Jiří: *Řešené příklady z analýzy elektrických obvodů*. Praha: SNTL, 1984. 288 s.
6. MASSARINI, A., KAZIMIERCZUK, K: *Self-Capacitance of Inductors*. *IEEE Transactions on Power Electronics*, July 1997, vol. 12, No. 4, pp. 671–676. ISSN 0885-8993. DOI 10.1109/63.602562.